



**Les corridors de lahars du volcan Merapi (Java, Indonésie) : des espaces entre risque et ressource.
Contribution à la géographie des risques au Merapi.**

Edouard de Belizal

► **To cite this version:**

Edouard de Belizal. Les corridors de lahars du volcan Merapi (Java, Indonésie) : des espaces entre risque et ressource. Contribution à la géographie des risques au Merapi.. Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2012. Français. NNT : . tel-00931862

HAL Id: tel-00931862

<https://theses.hal.science/tel-00931862>

Submitted on 16 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les corridors de lahars du volcan Merapi (Java, Indonésie) : des espaces entre risque et ressource.

Contribution à la géographie des risques au Merapi.

Thèse présentée par Édouard de Bélizal

En vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Directeur de la thèse : Franck Lavigne, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Unité d'accueil : U.M.R. 8591 Laboratoire de Géographie Physique, CNRS



Thèse soutenue le 12 décembre 2012 devant le jury composé de :

G. Arnaud-Fassetta
F. Lavigne
P. Pigeon
M. Reghezza
P.G. Salvador
F. Vinet

Professeur, Université Paris 7 Denis-Diderot
Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Professeur, Université de Savoie
Maître de Conférences, École Normale Supérieure
Professeur, Université Lille 1
Professeur, Université Paul-Valéry Montpellier 3

Examineur
Directeur de la thèse
Rapporteur
Examinatrice
Rapporteur
Examineur



Jambu-Kaliadem, site d'extraction de dépôts de lahars dans la vallée Gendol, en août 2009



La vallée Gendol en mai 2012

« *Banjir ! Banjir ! Banjir !* »

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS	11
INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
PREMIÈRE PARTIE : CADRE SCIENTIFIQUE DE LA RECHERCHE	31
CHAPITRE 1 – CADRE GEOGRAPHIQUE, SCIENTIFIQUE ET PROBLEMATIQUE	33
I. <i>Le Merapi : un volcan composite insulaire en milieu tropical</i>	34
1. Un volcan composite connu	35
2. Un milieu à risque	44
II. <i>Les lahars comme aléa volcanique syn- et post-éruptif</i>	47
1. Terminologie et mécanismes	47
2. Un aléa majeur	53
III. <i>Risques et ressources en milieu volcanique : deux éléments indissociables ?</i>	58
1. Risque et ressource : la question de la vulnérabilité.....	58
2. Le cas des espaces volcaniques	62
3. Laves et matériel volcanoclastique comme ressources	64
CHAPITRE 2 – ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES	73
I. <i>Étudier les lahars et leurs corridors</i>	73
1. Définir la chronologie et l'événementiel des lahars : constitution d'une base de données « lahars »	74
2. Caractériser le fonctionnement des corridors de lahars	79
3. Caractériser les dépôts volcanoclastiques : morphologies, faciès sédimentaires et textures.....	84
II. <i>Du risque à la ressource : enquêtes et questionnaires</i>	88
1. Perception et connaissance : questionnaire au début de la saison des pluies 2010-2011.....	88
2. Dommages et gestion de crise	91
3. Les sites d'extraction : comment étudier le fonctionnement de cette activité ?	92
4. Obtenir une information quantifiée sur les travailleurs des sites d'extraction : questionnaires systématiques 100	
5. De l'aléa à la ressource : comment élaborer une étude de risque dans les sites d'extraction ?	103
DEUXIÈME PARTIE : LES IMPACTS DES LAHARS APRES L'ÉRUPTION DE 2010	109
CHAPITRE 3 – LES LAHARS DU MERAPI APRES L'ÉRUPTION DE 2010 : FREQUENCE, REPARTITION SPATIALE, CHRONOLOGIE ET DYNAMIQUES MORPHOGENES.....	111
I. <i>LES OCCURRENCES DE LAHARS APRÈS L'ÉRUPTION DE 2010</i>	112
1. Un aléa fréquent	112
2. Variabilité spatio-temporelle des débits : mesures et estimations d'après vidéos et enquêtes de terrain ...	119
II. <i>LES RÉPONSES DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE : EXEMPLES DES PROCESSUS MORPHOGÈNES DES LAHARS À ÉCHELLE LOCALE</i>	129
1. Incision et élargissement des chenaux : réactivation et formation des corridors de lahars	129
2. Les défluviations.....	139
3. Les débordements ponctuels	146

CHAPITRE 4 – ESPACES MENACÉS, IMPACTS SOCIOECONOMIQUES ET GESTION DU RISQUE	151
I. LES LAHARS REPRÉSENTENT-ILS UN RISQUE ?	152
1. Les espaces menacés et l'exposition des habitants	152
2. Des riverains préparés aux lahars ?	156
II. LES IMPACTS	162
1. Les habitations endommagées sur le talus distal	162
2. Des infrastructures endommagées	175
3. Des ressources menacées	180
III. GÉRER LES RISQUES LIÉS AUX LAHARS ET LEURS IMPACTS : RÉPARATIONS, PRÉVENTION ET SYSTÈMES D'ALERTE	183
1. Le rôle du gouvernement et des institutions affiliées	183
2. Les structures de la prévention	190
3. La gestion du risque par les communautés : relais d'information et système d'alerte	194
 CHAPITRE 5 – LE MATÉRIEL VOLCANOCLASTIQUE AU MERAPI APRÈS LES LAHARS DE 2010-2011 : DES DÉPÔTS DE BLOCS ET DE SABLE DANS LES CORRIDORS DE LAHARS	205
I. LES DÉPÔTS DE LAHARS DU MERAPI : PLANIMÉTRIE ET LITHOFACIÈS	205
1. Planimétrie des dépôts	206
2. Lithofaciès des dépôts de lahars de l'amont vers l'aval : la permanence d'une importante proportion des fractions grossières	217
3. Bilan	225
II. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES FRACTIONS FINES	227
1. Textures et structures sédimentaires	227
2. Répartition des sables du Merapi	233
3. Sables et activités humaines dans les corridors de lahars	236
 SYNTHÈSE ET DISCUSSION DE LA DEUXIÈME PARTIE	241
1. L'aléa lahar au Merapi après l'éruption de 2010-2011	241
2. Crise et gestion de crise	245
 TROISIÈME PARTIE : LES LAHARS COMME VECTEURS DE RESSOURCE : QUAND L'ALÉA DEVIENT UN MOYEN DE SUBSISTANCE	255
 CHAPITRE 6 – ÉVOLUTION ET ENJEUX DES SITES D'EXTRACTION DANS LES VALLÉES DU MERAPI AVANT L'ÉRUPTION DE 2010	257
I. L'organisation générale d'un site d'extraction	258
1. Matériel extrait et principes de vente	258
2. Les modes de travail	260
3. Les éléments structurants des sites d'extraction	263
II. Une ressource inégalement répartie (des années 1990 à 2010)	267
1. Variation spatio-temporelle des volumes extraits au cours des années 2000	267
2. Tariement et fermetures des sites occidentaux : le déclin du bassin d'extraction de Magelang	272
3. Jambu-Kaliadem (Gendol) : une activité intense et l'affirmation du bassin d'extraction Gendol-Woro à la fin des années 2000	274
4. Sites satellites, sites secondaires, et sites mineurs sur le versant sud du Merapi	283
III. Un impossible encadrement institutionnel de l'activité	286
1. Une activité lucrative	286
2. Un cadre législatif confus : une régulation théorique qui peine à se mettre en pratique	291
IV. Enjeux sociaux et environnementaux d'une activité informelle	301
1. Des conflits multiples	301
2. Conséquences environnementales	304

CHAPITRE 7 – LES SITES D’EXTRACTION APRES L’ERUPTION DE 2010 : PERMANENCES, MUTATIONS, ET RISQUES ..	315
I. Répartition des sites d’extraction après l’éruption de 2010	316
1. Une nouvelle répartition spatiale.....	316
2. Fréquentation des sites d’extraction, volumes exploités et prix des matériaux après l’éruption de 2010.....	319
II. Travailler dans les sites d’extraction après l’éruption de 2010 : résultats du questionnaire de 2011	327
1. Aperçu des résultats.....	327
2. Variabilité spatiale des sites d’extraction.....	332
III. Évaluation des risques dans les sites d’extraction du Merapi.....	337
1. Comprendre la vulnérabilité dans les sites d’extraction	337
2. Évaluation du risque dans les sites d’extraction	341
3. L’aléa et la ressource : une approche systémique du risque.....	356
SYNTHÈSE ET DISCUSSION DE LA TROISIÈME PARTIE.....	361
1. Quantifier le risque : intérêt et limites	361
2. Ressource et risques dans les corridors de lahars.....	366
 CONCLUSION GÉNÉRALE	 375
 BIBLIOGRAPHIE	 385
 LISTE DES FIGURES	 405
 LISTE DES TABLEAUX	 410
 ANNEXES.....	 413
ANNEXES A : LES LAHARS DU MERAPI APRES L’ERUPTION DE 2010	II
ANNEXES B : GESTION DE CRISE.....	XXXVIII
ANNEXES C : GRANULOMETRIE DES DEPOTS DE LAHARS.....	XL
ANNEXES D : LES QUESTIONNAIRES	XLVII
ANNEXES E : LES SITES D’EXTRACTION DU MERAPI.....	LXIX

Avant-propos et remerciements

Au moment où cette thèse est prête à être déposée, dans cet instant grisant pendant lequel le sentiment du travail accompli prend le pas sur la fatigue des derniers jours de labeur, il apparaît nécessaire de revenir sur ces trois années dont le présent manuscrit représente l'aboutissement. Certaines personnes estimaient qu'entreprendre un doctorat s'apparentait à un travail long, austère, voire quasi-monacal. Toutefois, je n'ai jamais ressenti de solitude pesante durant cette expérience doctorale, qui s'est déroulée dans le cadre d'un projet européen, a été encadrée par une équipe dynamique et a été stimulée par bon nombre de personnes. Que tous ceux qui de près ou de loin ont participé, à leur manière, à l'achèvement de ce travail en soient remerciés.

Ma gratitude s'adresse tout d'abord à Franck Lavigne, avec lequel j'ai eu la chance de travailler durant mes deux années de Master, et qui m'a fait confiance pour trois ans de doctorat. Il a su, avec simplicité mais efficacité, me transmettre sa passion du terrain, son sens de l'observation et de l'analyse ainsi que la rigueur scientifique. Que ce soit en m'accompagnant sur le terrain, en me poussant à publier certains résultats et à communiquer dans des colloques internationaux, en me proposant des (ré)orientations méthodologiques ou en relisant chaque chapitre de cette thèse (rendus dans le désordre et en commençant par la fin, pour faire simple), il a réellement accompagné la réalisation de cette thèse. Je lui sais gré de tout ce que j'ai pu apprendre durant ces années de doctorat, et j'espère que ce premier pas dans le monde de la recherche marquera le début de nombreuses autres collaborations. Merci Franck.

Je remercie également très chaleureusement les membres du Laboratoire de Géographie Physique UMR 8591 où j'ai passé une bonne partie de mon temps lorsque je n'étais pas sur le terrain. En premier lieu – je lui dois bien ça – je remercie Delphine Grancher, ingénieure statisticienne qui a également suivi l'élaboration de ce projet depuis sa genèse, à Kelut à l'été 2008, jusqu'à son aboutissement. Tout au long de ces trois années, à chacune de ses prétendues « dernières missions en Indonésie », Delphine (Davin) s'est toujours montrée disponible pour discuter du sujet, de ses réorientations, et s'est même frottée à l'exercice monotone du comptage des camions. Réquisitionnée pour la lecture du manuscrit, elle a accepté d'en relire les chapitres pendant l'été 2012, un peu à la manière d'un roman-feuilleton. Sa disponibilité, sa rigueur, son humour et son sourire méritent dans ces remerciements la place de choix qui leur est due. Je tiens également à remercier Daniel Brunstein, pour son aide patiente dès que je rencontrais un souci sur ArcGis, et pour s'être montré toujours positif et encourageant, notamment durant les mois de rédaction. Pour m'avoir dévoilé les arcanes de la sédimentologie, et avoir accepté de relire quelques passages du manuscrit, j'adresse un grand merci à Jean-Philippe Degeai. Nos discussions sur le terrain, à Lombok, et au LGP ont été précieuses à l'élaboration de certaines analyses. Je remercie également les autres membres du LGP, qui n'ont pas forcément participé directement à l'élaboration de la thèse, mais qui ont contribué à maintenir une ambiance conviviale et stimulante. Je tiens d'ailleurs à adresser mes plus vifs remerciements à tous les doctorants avec lesquels j'ai pu partager des heures de travail efficaces dans la « salle des doctorants », mais aussi des moments de détente bienvenus, que ce soit les pauses café-

cigarette(s) ou les séances de puces sauteuses intempestives. Un grand merci en particulier à : Antoine (pour qui qu'tu t'prends ? pour Clint Eastwood ? – raster), Irina (Y.O.U. – oy), Salomé, Marina, Thomas, Jégouanne (un grand merci à ton dévouement et à ta confiance !!), Romain, Anne Lemahieu (seras-tu là ?), et Estu. Je n'oublie pas les anciens (Alexandre, Nathalie et ses conseils de mise en page, Aurélien) ni les nouveaux (Séverine, Marion) qui eux-aussi ont participé à la bonne atmosphère entre doctorants du LGP.

Je suis reconnaissant de l'aide que certains chercheurs extérieurs au LGP m'ont apporté durant ces années de thèse, notamment J.C. Gaillard (School of Environment, Université d'Auckland, Nouvelle-Zélande) qui a veillé à enrichir ma culture bibliographique sur le thème de la vulnérabilité. Je remercie aussi les doctorants d'autres universités, avec lesquels j'ai pu échanger sur beaucoup de thèmes : Julie Morin (Institut de Physique du Globe de Paris), Laetitia Laigre (Institut de Géographie, Université de Lausanne), Tawia Abbam (Université de Southampton, Royaume-Uni) et Melanie Froude (Université East Anglia, Norwich, Royaume-Uni).

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail qui, je l'espère, sera à la hauteur de leur exigence scientifique : Gilles Arnaud-Fassetta (Paris 7), Patrick Pigeon (Université de Savoie), Magali Reghezza (École Normale Supérieure), Pierre-Gil Salvador (Université Lille 1) et Freddy Vinet (Université Montpellier 3).

Je souhaite remercier les différentes instances administratives qui ont encadré la thèse. En premier lieu l'École Doctorale de Géographie de Paris, qui m'a attribué un contrat doctoral en juin 2009. Je remercie également le programme de recherche européen MIA VITA, supervisé par le BRGM, qui a permis la prise en charge de nombreux frais de terrain (frais de déplacements, acquisition d'images aériennes par ULM, impression des questionnaires et rémunération des étudiants, participation à des colloques internationaux). Je suis également très reconnaissant à Danang Sri Hadmoko d'avoir soutenu ma candidature à la bourse du Ministère de l'Éducation Nationale indonésien « Living cost subsidy for PhD Sandwich Program Scholarship for Foreign Student » que j'ai obtenue. Merci à l'International Association of Geomorphologists (IAG) de m'avoir accordé une bourse pour me rendre à Windsor en décembre 2011 suivre un séminaire doctoral en géomorphologie, où j'ai noué des contacts précieux.

Le travail de terrain nécessaire à la réalisation de cette thèse a été grandement facilité par de nombreuses aides en Indonésie, que je tiens à saluer. Un grand merci tout d'abord à Danang Sri Hadmoko, ancien doctorant de Franck Lavigne et désormais enseignant-chercheur à l'Université Gadjah Mada (UGM) de Yogyakarta. Son sens de l'accueil et ses nombreux conseils méthodologiques ont été vraiment appréciables, et je le remercie également de m'avoir invité dans les séminaires organisés dans sa faculté en 2010 et 2011, qui ont été l'occasion d'échanges fructueux. Je remercie également les étudiants qu'il a recrutés pour effectuer le travail de questionnaire dans les sites d'extraction en juin 2011 : Manda, Dimas, Hendra, Qodhan et Bayu, qui ont veillé à bien respecter mes consignes d'enquête, et qui ont fourni un travail remarquable d'acquisition de données. Estu Mei, doctorante au LGP et chargée de cours à UGM a également beaucoup apporté à cette thèse, en supervisant notamment le travail de questionnaires de connaissance de l'aléa lahar et de perception du risque en décembre 2010 alors que j'étais en France : merci aux étudiants qui

y ont participé, M. Misqi, Akhati Muflikah, Indira Dwi Ariani et Fridah Nugraheni. Je suis très reconnaissant aux étudiants de Master de Paris 1 qui m'ont assisté sur le terrain : Vincent Horny et son très bon film sur les risques de lahars à Yogyakarta (janvier-avril 2011), Anne-Kyria Robin (mai 2011) et surtout Baptiste Le Mauff et Marie Coquet qui se sont rendu au Merapi de novembre 2011 à février 2012 pour compléter la base de données que j'avais entreprise. Leur aide a été bienvenue, et précieuse pour accélérer cette étude.

Je remercie également Noer Cholik, ingénieur d'étude au BPPTK (Bureau de Volcanologie de Yogyakarta) pour sa bonne humeur communicative, son efficacité sur le terrain, et sa connaissance du Merapi (et des meilleurs crus des cafés indonésiens). J'ai pu grâce à lui bénéficier de quelques séminaires organisés pour le personnel du Bureau de Volcanologie, notamment une semaine de formation à la modélisation des flux de lahars sous Titan 2D et LaharZ dispensée par Christina Widiwijayanti, de l'Earth Observatory of Singapore (E.O.S., Université des Sciences et Technologies de Nanyang). Je remercie à ce sujet tout particulièrement Christina, ainsi que Christopher Newhall, qui ont accepté de m'accueillir plus longuement à l'E.O.S. en juillet 2011, pour m'initier de manière approfondie à LaharZ. Même si je n'utilise pas, finalement, les modèles dans ma thèse, j'ai acquis un savoir-faire qui ne pourra que m'être utile par la suite. Je n'oublie pas non plus Ibu Ari, du BPPTK, qui s'est montrée d'une grande gentillesse et d'une grande efficacité en mettant à ma disposition les archives du bureau.

En-dehors du monde scientifique, je remercie la « mafia balinaise » qui m'a prêté main forte pendant les investigations de terrain en 2010 : Hardy Wiratama, Nyoman et Komang Agus Putrayasa avec lesquels j'ai arpenté les sites d'extraction et parcouru les routes les plus reculées du Merapi. Ils m'ont bien aidé pour le comptage des camions, ainsi que pour la mesure fastidieuse des diamètres des carrières pratiquées dans les dépôts de lahars. J'en profite également pour exprimer toute ma gratitude aux habitants du Merapi qui se sont prêtés au jeu des entretiens et des questionnaires, mais aussi ceux avec qui j'ai partagé de longues et fructueuses discussions qui ont permis de caler de nombreux éléments. Mineurs des carrières du Merapi, tenanciers de *warung*, chauffeurs de camion, jeunes bénévoles surveillant les rivières, ont tous été d'une grande gentillesse et parfois d'une aide précieuse lorsqu'il s'agissait de me prévenir de l'occurrence de lahars sur des secteurs que je ne pouvais surveiller tous à la fois. Merci à Mbak Yarni (et ses excellents *tempe*), à Ibu Purus (et à ses tentatives de m'apprendre des rudiments de javanais), à Mas Ari, Pak Widiyanto, Mas Janis et Mas Sihadi. Remerciements tous particuliers à Mas Darmo, d'Argomulyo, sa fiancée Aning et à sa famille qui m'ont toujours réservé un accueil des plus chaleureux en me considérant comme un des leurs ; je me souviendrai toujours de cet après-midi du 22 mars 2011, lorsque le village de Panggung a été inondé par un lahar, et que nous essayions désespérément de faire évacuer des vaches assez peu coopératives, sous des trombes d'eau et les pieds dans la boue. Je n'oublie pas non plus les entretiens, les discussions efficaces et les sorties de terrain faites avec les membres du groupe des *Pecinta Alam*, constitué de volontaires en charge de la prévention des lahars. Je remercie tout particulièrement Mas Asep, d'une grande disponibilité et toujours prêt à m'intégrer aux réunions d'information de son organisation, me permettant de rencontrer toujours plus de personnes et de mieux saisir la manière dont fonctionne la gestion des risques liés à un aléa aussi fréquent que les lahars. Les responsables d'entreprises ou de centres de stockage et de vente du sable (*depo pasir*) sont également remerciés : Pak Bejo, Pak Suparman, Pak

Siswanto, Pak Anton. Merci également à l'architecte Pak Eko Prawoto qui m'a accordé un entretien lors de son passage à Paris en novembre 2010. Enfin, un grand merci aux membres d'institutions et d'administrations rencontrés dans les différents districts du Merapi, pour m'avoir accordé du temps : merci à Joko Sudibyo (Bureau des Mines de Magelang), à Pak Purwanto (Bureau des Mines de Sleman), à Pak Urip Bahagia (Bureau de l'Environnement de Sleman), Pak Manis (Proyek Merapi), Pak Sudradjat (Volcanic Sabo Center), Pak Joko Wiyarno (commune de Tamanagung) et Pak Muryono (maire de la commune de Sirahan).

Je salue également tous les amis que j'ai pu rencontrer en Indonésie pendant les périodes de terrain, et qui ont été des soutiens bienvenus. Pour tous les bons moments passés au Teratai, au Sego Macan ou au Milas, je remercie Djaya (qui a également traduit le questionnaire de juin 2011), Esti, Fanny et Abenk, Claire, Ana, Amel, Leslie et Coralie. Un grand merci également à la directrice du Centre Culturel Français de Yogyakarta (L.I.P.) Marie Le Sourd, à l'intérêt qu'elle a porté à mes travaux depuis mes années de Master et à tous les événements qu'elle a supervisés au LIP. Mention également au *es jeruk* et aux crêpes au chocolat du Café LIP servis par un personnel remarquable : Mbak (mbah ?) Susy, Mbak Dewi, Mbak Diakonia, Mbak Asih.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à tous ceux qui, en France, ont été des appuis directs ou indirects à ce travail. Je suis reconnaissant à l'U.F.R. de Géographie de Paris 1 de m'avoir accueilli en tant que moniteur dans son équipe pédagogique, et à son équipe de direction (Bernard Tallet et Étienne Cossart) qui a toujours été attentive à me semestrialiser pour faciliter les travaux de terrain. Je remercie également mes anciens enseignants et collègues avec qui j'ai travaillé, pour leurs conseils et leur soutien, notamment Charles Le Cœur, Marie Chenet, Frédéric Gob, Béatrice Collignon et Yann Le Drézen (toujours enthousiaste et positif ! Merci !). Je n'oublie certainement pas mes amis de longue date, qui ont été toujours présents pendant ces années de doctorat, et envers qui je suis particulièrement redevable : toutes mes pensées à Yves et Astrid, à Jonathan, à Juliette, à Aude, à Camille et Clémence, à Séverine (loin des yeux mais pas du cœur), Camille Botrel, Alexandre, ainsi qu'à Marie-Lise et Ségolène, qui ont suivi la fin de la rédaction.

Enfin, je clos ces remerciements par ceux que je souhaite adresser à mes parents et à ma famille, pour leur soutien indéfectible durant toutes ces années de master et de thèse. Plus que de simples remerciements, c'est toute mon affection que je souhaite leur exprimer. Ce manuscrit, quelque part, leur est dédié, car il leur doit énormément.

INTRODUCTION GÉNÉRALE



Le Merapi vu depuis les quartiers nord de Yogyakarta, avec le Merbabu en arrière-plan

INTRODUCTION GÉNÉRALE

« Risques et catastrophes sont certes provoqués par les volcans, mais les moyens de subsistance, les ressources, proviennent également des volcans » (Kelman et Mather, 2008).

CONTEXTE DE LA THÈSE

Chaque année, les volcans terrestres rejettent de 6 à 8 km³ de matériaux volcaniques, dont plus d'un tiers sur les terres émergées (Dehn et McNutt, 2000). Il peut s'agir de lave, désignant le magma émis de manière fluide, ou bien de téphras qui sont des particules solides (blocs > 64 mm, lapilli de 2 mm à 64 mm et cendres < 2 mm) issues de la fragmentation du magma lors de sa remontée (Cashman et al., 2000 ; Thornton, 2000). Dehn et McNutt (2000) estiment que cette quantité suffirait à recouvrir l'équivalent de 1600 terrains de football sous près d'un kilomètre de dépôts. L'émission du magma à la surface de la Terre peut représenter un danger : les hautes températures, la présence de gaz, l'extension des coulées de lave et l'éjection des téphras provoquent des dommages. Les phénomènes volcaniques sont ainsi à l'origine d'aléas naturels, ou « phénomènes d'origine naturelle potentiellement dommageables » (Leone et al., 2010, p. 25). Cependant, le matériel émis lors de ces phases éruptives potentiellement dangereuses peut servir en retour les communautés humaines en fournissant des ressources géothermales et minérales. Les volcans sont des espaces qui combinent danger et ressource, cette dernière justifiant les très fortes densités de population sur nombre de volcans actifs, notamment en milieu tropical (arcs insulaires de l'Asie et du Pacifique, Cordillère des Andes, Caraïbes), en dépit des catastrophes que peuvent provoquer les éruptions (Santa Maria, 1906, au Guatemala ; Montserrat, 1997-2010 et Montagne Pelée, 1902, aux Antilles ; Pinatubo, 1991 aux Philippines ; Nevado del Ruiz, 1985, en Colombie). Les éruptions volcaniques ont tué directement 270 000 personnes depuis le début du XVII^e siècle et plus de 80 000 pour le seul XX^e siècle (Nakada, 2000 ; Rodolfo, 2000 ; Leone et al., 2010). Ces chiffres ne tiennent pas compte des centaines de milliers de victimes indirectes, notamment causées par les famines consécutives des bouleversements environnementaux d'une éruption, telles celles qui ont suivi l'éruption du Laki (Islande, 1783) ou du Tambora (Sumbawa, Indonésie, 1815).

Ce sont actuellement plus de 400 millions de personnes qui vivent à moins de 50 km d'un volcan actif, notamment dans de grandes agglomérations telles Mexico (8 millions d'habitants) à une quarantaine de km du Popocatépetl ; Naples (1 million d'habitants) à une quinzaine de km du Vésuve ; Arequipa (900 000 habitants) à moins de 15 km d'El Misti ; ou encore Yogyakarta à une vingtaine de km du volcan Merapi (Chester et al., 2000 ; Leone et Vinet, 2006). Ce dernier a connu tout au long du XX^e siècle jusqu'en 2010 une activité marquée par une forte récurrence d'éruptions d'intensité moyenne ($VEI^1 = 2$ ou 3) qui en ont fait l'un des

¹ *Volcanic Explosivity Index*, qui évalue de 1 (valeur minimale) à 8 (valeur maximale) la puissance volcaniques. Les quatre plus importantes éruptions du XX^e siècle ont été évaluées de VEI 5 (St. Helens, 1980

volcans les plus actifs du monde, mais aussi l'un des plus dangereux car plus d'un million de personnes vivent sur ses flancs. La présente thèse a pour objectif de fournir une contribution aux nombreuses études traitant du Merapi, afin d'approfondir les connaissances sur la question des risques qui y existent, notamment à travers le décryptage des différentes conséquences que produisent certains de ses phénomènes appelés « lahars », qui désignent des coulées de débris et des coulées de boue constituées de matériel volcanique.

La géographie des risques consiste en l'étude spatialisée du danger lié aux lahars : il s'agit de situer le risque, de le délimiter, mais aussi d'en discuter l'origine ainsi que les moyens de le réduire. Cette approche suppose une lecture intégrée voire systémique de l'espace considéré (Pigeon, 2002), où les apports des sciences de la Terre se combinent à ceux des sciences sociales. La géographie des risques offre l'avantage d'une expression synthétique de ces deux domaines scientifiques, où l'un n'est pas le décor de l'autre : il faut au contraire en rechercher les interactions qui sont à l'origine du risque. Si la thèse présente un travail de géographie physique consacré au fonctionnement dynamique et aux processus morphosédimentaires d'un type de milieu particulier (volcan actif tropical), elle est prolongée par une étude abordant les populations qui y vivent. Elle met donc en avant une approche multifactorielle du risque, consacrée à l'analyse de ses trois composants, qui seront plus largement présentés au chapitre 1 : l'*aléa* (phénomène d'origine naturelle, représenté ici par les lahars), la *vulnérabilité* (que l'on peut considérer comme une propension à l'endommagement liée aux faiblesses socioéconomiques d'une communauté), les *enjeux* (éléments dont la perte représente un manque à gagner). Ce travail associe donc des méthodes de géomorphologie pour définir un aléa et en évaluer les impacts, ainsi que des méthodes de géographie sociale pour comprendre les dynamiques socioéconomiques des populations locales et estimer les enjeux.

C'est lors d'une mission de terrain en 2008 avec Franck Lavigne qu'a été élaboré le sujet du projet de thèse réalisé en Master 2 Espaces, Dynamiques des Milieux et Risques (De Bélizal, 2009) : pourquoi autant de camions et de personnes vont et viennent dans les fonds de vallée du Merapi, alors même qu'il s'agit d'espaces pouvant être affectés par les aléas volcaniques ? Cette exposition problématique de centaines de personnes ne semblait pas renseignée dans la littérature scientifique. L'hypothèse de départ était que l'étude de cette activité pourrait apporter une clé de lecture complémentaire du risque existant sur les flancs du volcan Merapi, auquel était consacré un programme de recherche.

En 2008 a effectivement débuté pour quatre ans le programme de recherche européen MIA VITA (*MI*tigate and *Ass*ess risk from *Vol*canic *Impact* on *Terrain* and *human Activities*), dont l'objectif est de proposer des méthodes de gestion des risques en milieu volcanique à l'aide d'une approche pluridisciplinaire. Coordonné par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), le projet regroupe quinze organismes de recherche et de protection civile de dix pays différents dont cinq hors Europe (Cameroun, Philippines, Indonésie et Cap-Vert). Quatre volcans laboratoire ont été définis : le Fogo au Cap-Vert, le Kanlaon aux Philippines, le Mont Cameroun (Cameroun) et enfin le Merapi, en Indonésie. Le programme de recherche cherche à développer et à valoriser, sur chacun de ces volcans, des outils permettant de mieux connaître les risques encourus par les populations locales.

dans l'État de Washington, États-Unis, et El-Chichón, 1982 au Mexique) à VEI 6-7 (Pinatubo, 1991 aux Philippines, et Katmai, 1912 en Alaska, États-Unis.).

MIA VITA est divisé en huit *work packages*, chargés d'acquérir des données géophysiques sur chacun des volcans étudiés, mais aussi d'en étudier le cadre social et économique pour proposer une analyse approfondie de la vulnérabilité des personnes qui y résident. Le *work package* 5, dirigé par Franck Lavigne (Paris 1 Panthéon-Sorbonne, CNRS UMR 8591 Laboratoire de Géographie Physique) et Jean-Christophe Gaillard (School of Environment, University of Auckland, Nouvelle-Zélande) a notamment pour ambition de dresser un état des lieux de la vulnérabilité sur chacun des volcans, et de proposer une méthode de cartographie participative en trois dimensions pour aider à la décision en période de crise et ainsi favoriser l'implication des communautés dans la gestion des risques. Le programme a ainsi donné lieu à trois thèses de doctorat consacrées au seul volcan Merapi au sein du Laboratoire de Géographie Physique, dirigées par Franck Lavigne. Ce volcan n'est d'ailleurs pas un espace méconnu dans cette UMR, puisqu'il y a fait déjà fait l'objet de plusieurs mémoires de Master pendant les années 2000-2010. La grande fréquence de ses éruptions sur un espace très densément peuplé (plus de 950 hab./km² à Java Centre, De Koninck, 2005) de plus en plus gagné par l'urbanisation démultiplie les possibilités d'approche des risques en permettant une étude sans cesse renouvelée des aléas éruptifs, de la vulnérabilité des habitants et des enjeux qui produisent le risque.

L'ESPACE ÉTUDIÉ

Le volcan Merapi fait partie des 130 volcans actifs indonésiens dont la localisation suit les grands traits de la tectonique de l'archipel (Figure 1). Sa structure est très largement guidée par des lignes de failles mises en place durant l'ère Tertiaire et qui se combinent en trois arcs principaux (De Koninck, 2005). Le premier de ces arcs, non volcanique, est externe et concerne les petites îles du large de Sumatra comme Simeulue, Nias ou Siberut, puis, au sud-est, les îles de Sumba et de Timor ; il s'incurve enfin vers Seram et Halmahera, à l'ouest de la Papouasie. Le second arc est interne, largement animé par le volcanisme, et soutient Sumatra, Java et les petites îles de la Sonde. Le troisième arc est dérivé des deux premiers, dont il apparaît comme un prolongement, et supporte les Moluques et l'île de Sulawesi, elles-aussi marquées par un volcanisme actif. En revanche, au cœur de la surface délimitée par les lignes de faille et les limites de plaques lithosphériques, guidant la forme incurvée de l'archipel indonésien, l'île de Bornéo apparaît nettement plus stable, puisqu'elle repose au cœur de la plateforme continentale de la Sonde. Ce sont donc les îles qui délimitent les contours de l'archipel qui sont les plus marquées par les mouvements géodynamiques, lesquels se manifestent par des séismes (Banda Aceh à Sumatra en 2004, Yogyakarta sur Java en 2006, ou Padang à Sumatra) en 2009, ainsi que par le volcanisme. Les volcans indonésiens sont caractérisés par des dynamiques éruptives explosives, fréquentes en régime de subduction où le magma est riche en éléments volatils apportés par la fusion de croûte océanique hydratée (Fisher et Schmincke, 1984 ; Grove, 2000 ; Bardintzeff, 2006). L'île de Java est parcourue dans toute sa longueur (Figure 1) par 25 volcans actifs qui ont provoqué certaines des plus fortes éruptions historiques (Kelut, 1586 ; Krakatau, 1883 ; Galunggung, 1982). La proche région du Merapi au centre de l'île de Java est marquée par la présence de

quatre volcans actifs formant deux paires de cônes jumeaux dans un périmètre de moins de 50 km : Sindoro et Sumbing, Merapi et Merbabu (Figure 2, Figure 3A, Figure 4).

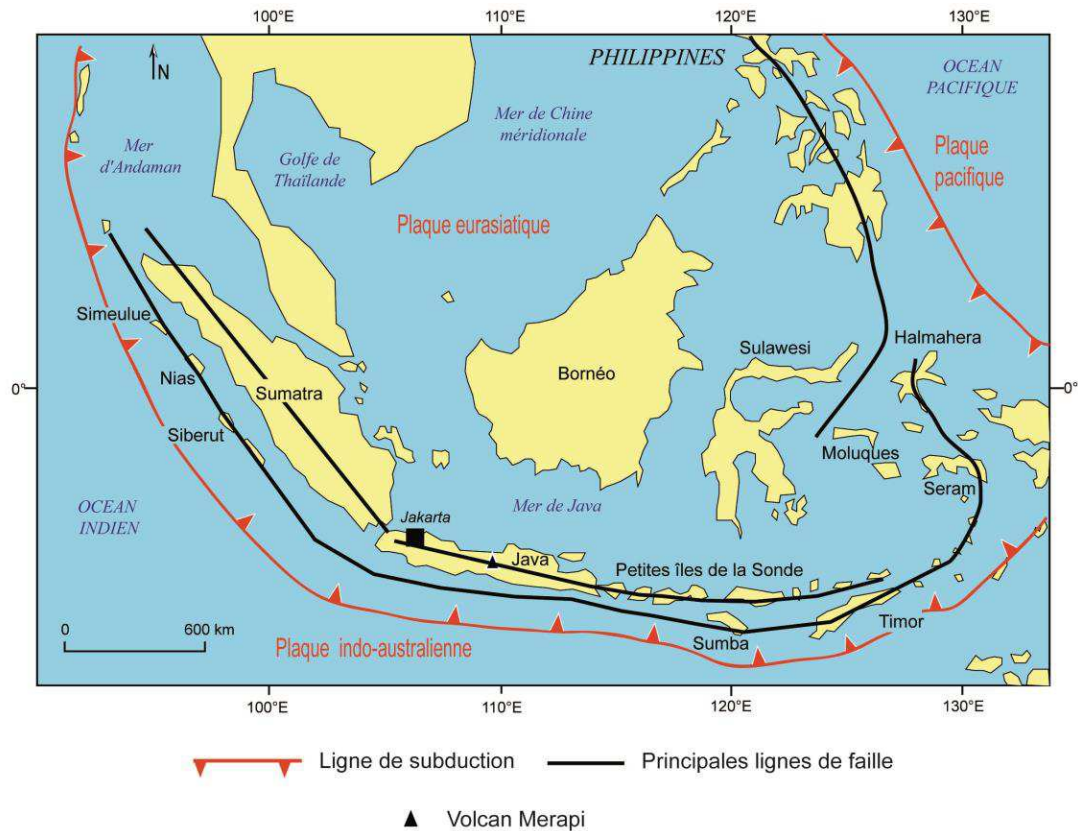


Figure 1 - Tectonique et volcanisme indonésien (modifié de De Koninck, 2005)



Figure 2 - Les alignements des volcans javanais et les flancs est du Merapi et du Merbabu (cliché E. de Bélizal, 2012).

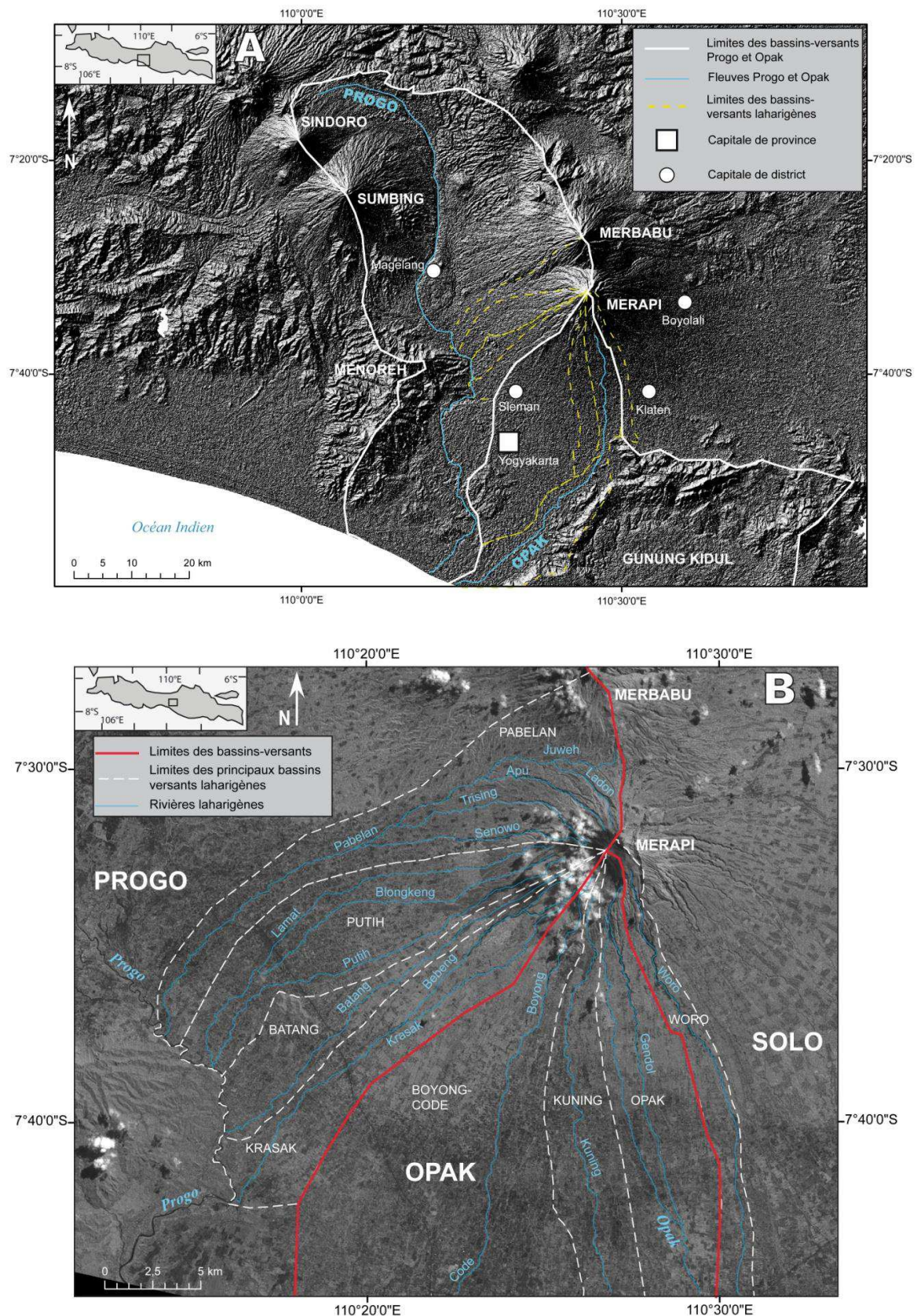




Figure 4 - L'île de Java: des volcans et des grandes villes

Le Merapi culmine à 2965 m d'altitude, au-dessus d'une plaine annulaire formée par l'accumulation du matériel éruptif et sédimentaire s'étendant jusqu'à l'océan indien, une cinquantaine de kilomètres au sud. Le réseau hydrographique du volcan est particulièrement dense, comptant plusieurs milliers de ruisseaux temporaires de dimension modestes s'écoulant dans trois bassins-versants (Figure 3A, Figure 3B) : celui du Progo (nord et ouest du volcan), de la Opak (sud du volcan) et du Solo (est du volcan). Comme le versant oriental du volcan, n'est pas affecté par les éruptions, la thèse se focalisera essentiellement sur les bassins-versants Progo et Opak, eux-mêmes divisés en huit principaux bassins-versants comptant au total 20 rivières (Tableau 1).

Tableau 1 – Organisation et dimension des bassins-versants du Merapi

Bassin-versant des fleuves	Bassins-versant des tributaires situés sur le Merapi		
	Nom	Superficie (km ²)	Rivières
PROGO (sup. totale 2438 km ²)	Pabelan	115	Juweh Ladon Apu Trising Senowo Pabelan
	Putih	89	Sat Lamat Blongkeng Putih
	Batang	42	Batang
	Krasak	72	Bebeng Krasak
OPAK (sup. totale 1744 km ²)	Boyong-Code	439	Bedog Boyong Code
	Kuning	84	Kuning
	Opak	339	Opak Gendol
SOLO (sup. totale : 16 100 km ²)	Woro	41	Woro

Le fleuve Progo est presque entièrement nourri par des tributaires venus des pentes des volcans Sindoro, Sumbing, Merbabu et Merapi, ainsi que par les rivières issues des Monts Menoreh (massif andésitique tertiaire). En revanche, le bassin-versant du fleuve Opak englobe non seulement le sud du Merapi, mais comprend également le plateau karstique de Gunung Kidul. Quant au Solo, il s'agit avec le Brantas (Java-Est), du plus vaste bassin-versant de l'île de Java (Figure 4), situé très largement hors de la zone d'étude, à l'exception du petit bassin-versant de la Woro qui est affecté par les dépôts des éruptions.

L'espace d'étude de la thèse est également contraint par l'organisation territoriale du Merapi, complexe et morcelée entre plusieurs entités administratives dont les modes de fonctionnement ne sont pas forcément identiques. Ce découpage a des répercussions sur l'organisation et l'aménagement du territoire qui seront discutés au cours de la thèse. L'échelon territorial le plus élevé est la province (*propinsi*), composée de plusieurs districts (*kabupaten*) eux-mêmes divisés en sous-districts (*kecamatan*) qui regroupent des communes (*desa*). Ces communes

contiennent des villages (*dusun*) dont les limites n'apparaissent pas sur les cartes topographiques, ce qui en fait des unités territoriales difficiles à appréhender. L'un des objectifs du WP 5 de MIA VITA consistait d'ailleurs à cartographier les limites de villages dans les communes les plus proches du cratère pour faciliter l'étude à grande échelle des espaces à risque du volcan.

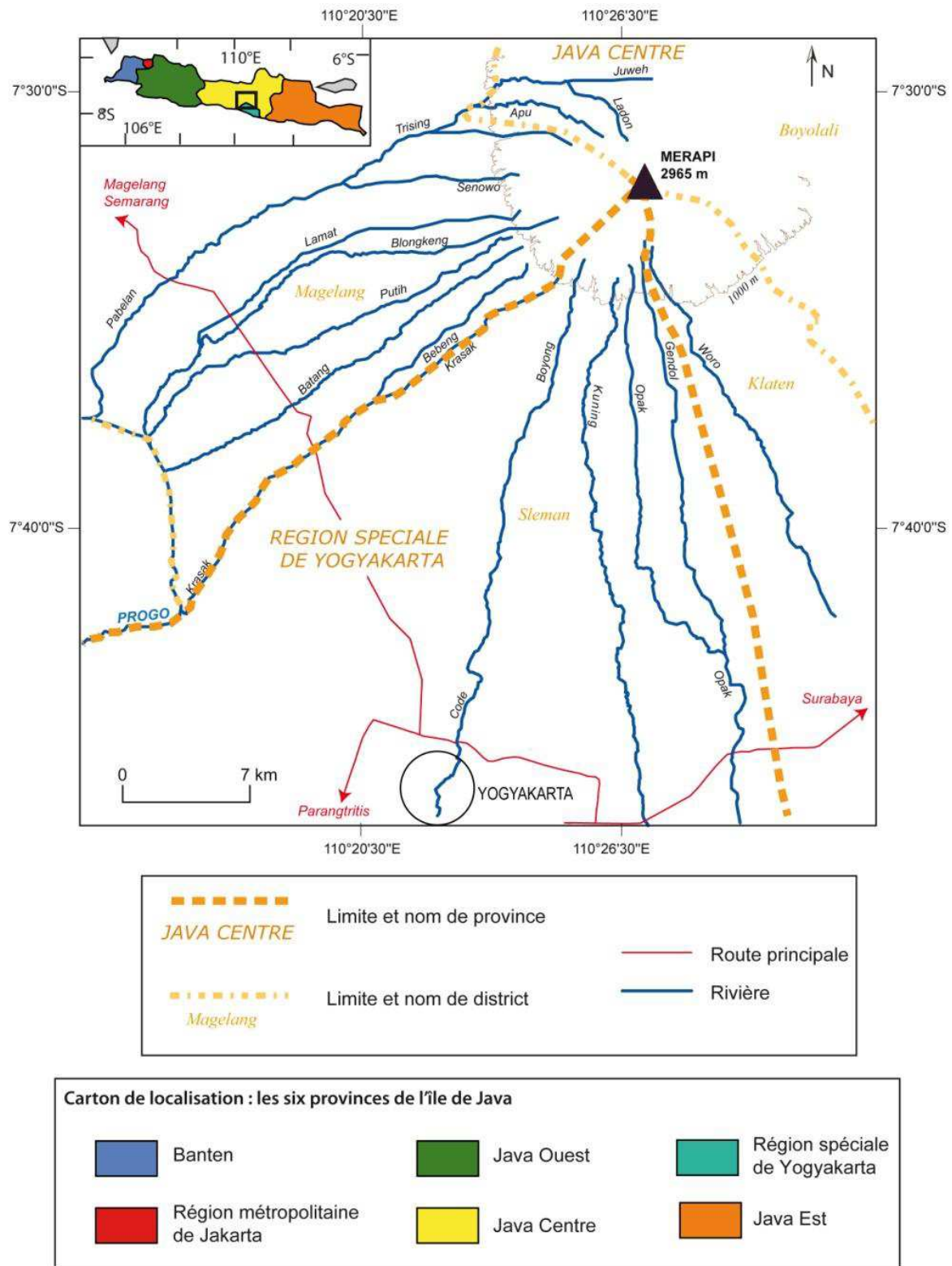


Figure 5 - Divisions administratives au Merapi : deux provinces et quatre districts

L'espace du Merapi est divisé en deux provinces (Figure 4, Figure 5) : Java Centre (ouest, nord et est du volcan) et la Région Spéciale de Yogyakarta (flanc sud). À l'image d'Aceh (Sumatra) et de Jakarta, Yogyakarta est une province de petite dimension bénéficiant d'une relative autonomie. Il s'agit en effet du territoire du royaume javanais de Mataram, dont la VOC (*Vereenigde Oost-Indische Compagnie*, Compagnie des Indes orientales, puissant organe économique et colonial des Pays-Bas) avait reconnu la souveraineté au XVIII^e siècle (Lombard, 1990). Suite à sa participation active lors de la résistance aux attaques de l'occupant néerlandais, Yogyakarta conserva par décret présidentiel son intégrité territoriale lors de l'indépendance du pays en 1945, avec le statut administratif de « province ». Elle bénéficie en outre d'une semi-autonomie.

Cet ancien cœur historique de Java, fonctionne aujourd'hui sur le modèle d'une petite principauté certes inféodée au gouvernement central de Jakarta, mais ayant conservé un mode de gouvernement dynastique. En effet, le gouverneur de la province a le titre de sultan et n'est pas élu par les administrés, puisque la fonction se transmet par primogéniture mâle au sein de la famille royale des princes javanais. Un référendum organisé en 2010 a nettement montré l'attachement des habitants de la province au sultan et au mode de fonctionnement monarchique de leurs institutions locales, traduisant bien la spécificité culturelle de cette province. Yogyakarta est d'ailleurs reconnue comme la capitale culturelle javanaise, où les anciennes traditions et croyances, notamment la spiritualité animiste *kejawen*, continuent d'être enseignées et pratiquées. Le volcan Merapi est un élément fondamental à la fois du territoire de cette province, dont il marque la frontière nord, mais également de la culture locale. La récurrence de ses éruptions a été source de mythes et de légendes faisant du volcan un espace parfois sacré, jouant un rôle de balancier des forces naturelles avec l'océan indien dans la géomancie de Yogyakarta, localisée à égale distance du volcan et de l'océan. La présence d'un gardien doté de pouvoirs chamaniques, médiateur entre le monde des hommes et celui des esprits, a contribué à ancrer plus encore le volcan dans une atmosphère mystique. Effectivement, le gardien du volcan nommé *juru kunci* (gardien des clés) est une personnalité respectée à Yogyakarta, et qui a du reste été très médiatisée depuis quelques années. Ses prises de position contre les autorités ont été largement relayées dans la presse, de même que son décès lors de l'éruption de 2010 ; la nomination de son successeur a été un événement. À une échelle plus fine, le Merapi est divisé en quatre districts (Figure 5) : Sleman (Yogyakarta), Magelang, Boyolali et Klaten (Java Centre). Les administrations des districts centralisent l'information des sous-districts et des communes, et constituent un interlocuteur inévitable pour tout chercheur, mais ne fonctionnent pas de manière harmonisée.

DES OBJECTIFS MODIFIÉS APRÈS L'ÉRUPTION DE 2010

L'objectif initial de la thèse visait à fournir une étude systémique de l'extraction des sables et des blocs dans les fonds de vallée et rivières du Merapi. Le projet de thèse défini dans le mémoire de Master 2 Espaces, Dynamiques des Milieux et Risques (Paris 1 ; De Bélizal, 2009) mettait en avant la nécessité de produire une quantification de la fréquentation des sites d'extraction, et proposait d'en analyser deux catégories d'impacts : d'abord les impacts environnementaux pouvant affecter l'agriculture et la ressource en eau ; ensuite les impacts sociaux, en explorant plus particulièrement la place de cette activité, évaluant sa durabilité et analysant ses conséquences sur la vulnérabilité sociale des communautés du Merapi. Le premier terrain de thèse (août 2009, puis mars-juillet 2010) a éclairci le fonctionnement de l'activité d'extraction sur le volcan Merapi. L'étude avait également vocation à renseigner une base de données sur plusieurs volcans javanais pour mieux appréhender l'ampleur de cette activité, dans plusieurs contextes régionaux ; une première recherche d'information avait commencé aux volcans Semeru et Kelut (Java-Est, De Bélizal, 2009), et devait être complétée par d'autres investigations sur l'Anak Krakatau (Détroit de la Sonde) à partir de la deuxième année de thèse. L'éruption du Merapi en octobre-novembre 2010 obligea toutefois à une refonte du projet initial, désormais plus exclusivement centré sur ce volcan.

Étant donné la récurrence des éruptions du Merapi (4 à 6 ans, Thouret et al., 2000 ; Surono et al., sous presse), l'événement de 2010 n'était pas inattendu, la dernière éruption s'étant déroulée en 2006. La thèse prévoyait implicitement l'occurrence d'un épisode éruptif de moyenne intensité (VEI 2-3) à l'image de ceux qui se sont déroulés tout au long du XX^e siècle, et se traduisant par l'effondrement du dôme sommital produisant des flux pyroclastiques (aussi appelés « nuées ardentes ») localisés dans un ou deux sous bassins-versants du volcan. Les quelques lahars qui auraient suivi l'éruption auraient permis d'évaluer le renouvellement des dépôts et de la ressource qu'ils constituent. Toutefois, l'éruption de 2010 a été bien plus puissante (VEI 4) et correspond à une récurrence centennale caractérisée par une plus grande quantité de téphras éjectés, sur la quasi-totalité de l'édifice (Surono et al., sous presse ; Pallister et al., sous presse). Compte-tenu de cette magnitude inattendue, l'amont des deux principaux bassins-versants du Merapi (Progo et Opak) fut recouvert par les téphras de l'éruption, et des lahars étaient donc possibles sur la quasi-totalité des rivières sillonnant les flancs du volcan, obligeant une nécessaire révision de l'aléa dont l'occurrence n'était plus cantonnée à une ou deux rivières. Par corollaire, l'exploitation des dépôts de lahars allait subir une évolution radicale, avec une certaine démultiplication des sites d'extraction sur l'ensemble du volcan. Il fut donc décidé d'axer le travail de thèse sur le Merapi en y intégrant les mutations spatiales que l'éruption allait nécessairement produire. L'étude des sites d'extraction allait prendre plus nettement une orientation vers l'analyse des risques, notamment si les lahars devaient s'avérer fréquents : on ne pouvait dès lors absolument plus faire l'impasse sur l'aléa. Toutefois, la vaste distribution spatiale des lahars, dans près de 17 rivières, en limitait considérablement la mesure de ses dynamiques : il n'existe pas de stations de mesure sur l'ensemble du volcan, et l'occurrence simultanée de lahars dans plusieurs rivières rend impossible l'acquisition systématique d'images. La thèse abordant la problématique des extractions sur

l'ensemble du Merapi, il n'apparaissait pas non plus possible de circonscrire l'étude de l'aléa sur une seule rivière compte tenu des nombreux déplacements quotidiens nécessaires à l'acquisition des autres données. Toutefois, la recherche d'information a permis d'établir une chronologie précise des lahars sur l'ensemble de la saison de mousson qui a suivi l'éruption de 2010, permettant dès lors d'estimer la fréquence de l'aléa, valeur fondamentale pour la mesure du risque. L'intensité de quelques événements a pu être reconstruite d'après les évidences de terrain, ainsi que par quelques vidéos lorsque cela était possible, mais ces données demeurent ponctuelles et n'ont qu'une valeur purement illustrative. En revanche, la thèse met l'accent sur les impacts des lahars, en cherchant à caractériser et à quantifier leurs conséquences sur la morphologie des rivières, transformées en véritable « corridors » de lahars, et en évaluant précisément les dégâts qu'ils ont provoqués, afin de mettre en avant les risques encourus par les habitants du Merapi après l'éruption de 2010. Les dépôts sont également étudiés, dans l'idée de montrer la composition de la ressource qu'ils constituent.

L'objectif initial de l'étude des sites d'extraction demeure globalement inchangée, mais l'éruption de 2010 a permis d'analyser plus précisément le rapport entre l'aléa et la ressource pour apporter une contribution à la géographie des risques au Merapi. Chaque jour, des centaines voire des milliers de personnes s'exposent aux lahars lorsqu'ils viennent en extraire les dépôts. Pourtant, cette activité n'est pas reconnue, et ne figure pas sur la carte « de risque » du volcan. L'idée est donc de définir les sites d'extraction comme des objets spatiaux devant être intégrés à la compréhension des risques qui existent sur le volcan. Il s'agira d'y quantifier le risque, et de discriminer ensuite les sites les plus dangereux en analysant quels y sont les principaux facteurs du risque. La thèse fonctionnera de manière multiscalaire, en effectuant des aller-retour entre une vision générale des phénomènes étudiés à l'échelle du Merapi (lahars, extraction), et des études de cas réalisées à l'échelle locale (communes, villages, sites d'extraction).

Au final, la contribution principale de ce travail sera de proposer une analyse des lahars dans un contexte postéruptif, intégrant à la fois les risques encourus par les personnes vivant à proximité des rivières, mais définissant également un autre espace de risque, encore méconnu : les sites d'extraction. Le rôle de l'activité d'extraction sera finalement discuté : s'agit-il d'une manne propre à augmenter la capacité des populations du Merapi face aux aléas ? S'agit-il au contraire d'une activité vulnérabilisante ? L'ensemble des conséquences des lahars sera ainsi présenté, selon plusieurs échelles spatiales et temporelles.

CONTENU ET ORGANISATION DE LA THÈSE

La thèse est divisée en trois parties et sept chapitres :

Partie 1 : Cadre scientifique de la recherche

- La présentation du cadre géographique, notionnel et problématique de la thèse **(chapitre 1)**,
- L'explication et la description des méthodes d'acquisition et de traitement des données **(chapitre 2)**.

Les résultats sont présentés et discutés dans les deux parties suivantes.

Partie 2 : Les impacts des lahars après l'éruption de 2010

- La récurrence des lahars, leur chronologie (avec mise en avant des événements les plus remarquables), une estimation de la variabilité spatiale et temporelle des débits et les impacts sur la forme des rivières à échelle locale. Plusieurs types sont distingués et expliqués, montrant que la dynamique morphogène des lahars aboutit à la réactivation ou à la formation de corridors de lahars **(chapitre 3)**,
- Les risques et les crises liés aux lahars : présentation des résultats d'une enquête de connaissance de l'aléa, évaluation des dégâts (bâti, infrastructures...) et présentation du système de gestion de crise **(chapitre 4)**,
- Les dépôts laissés par les lahars : description planimétrique des dépôts et estimation de leur volume, description des différents lithofaciès, et analyse granulométrique des sables qui constituent l'essentiel des matériaux exploités **(chapitre 5)**.

Partie 3 : Les lahars comme vecteurs de ressource : quand l'aléa devient un moyen de subsistance

- Une description des extractions au Merapi, leurs variations spatiales et temporelles depuis les années 1990 jusqu'à la veille de l'éruption de 2010, en insistant sur le fonctionnement des sites. La reconstitution des volumes extraits, l'organisation hiérarchique de cette activité informelle sont également exposés, ainsi qu'une vue d'ensemble des impacts environnementaux directs et indirects qu'ils provoquent **(chapitre 6)**,
- La situation des extractions après l'éruption de 2010 : évolution des sites et de l'organisation d'exploitation, quantification des volumes extraits. Les résultats d'une enquête par questionnaire réalisée auprès de plusieurs centaines de travailleurs aboutissent à une quantification de la vulnérabilité et des enjeux sur chaque site, permettant un calcul du risque. Les sites d'extraction sont intégrés à une carte des risques liés aux lahars du Merapi, et leur rôle dans une étude systémique des risques est démontré **(chapitre 7)**.

Les parties 2 et 3 s'achèvent sur une synthèse et une discussion des résultats qu'elles ont mis en avant ; ces paragraphes n'entrent pas dans la numérotation des chapitres.

Les Annexes proposent au lecteur le détail de certaines analyses (descriptif des questionnaires et traitement statistique, analyses granulométriques, tableaux de reconstitution des volumes exploités dans les sites d'extraction).

Une carte hors texte est prévue pour aider le lecteur à localiser les différents sites évoqués dans la thèse.

PREMIÈRE PARTIE

Cadre scientifique de la recherche

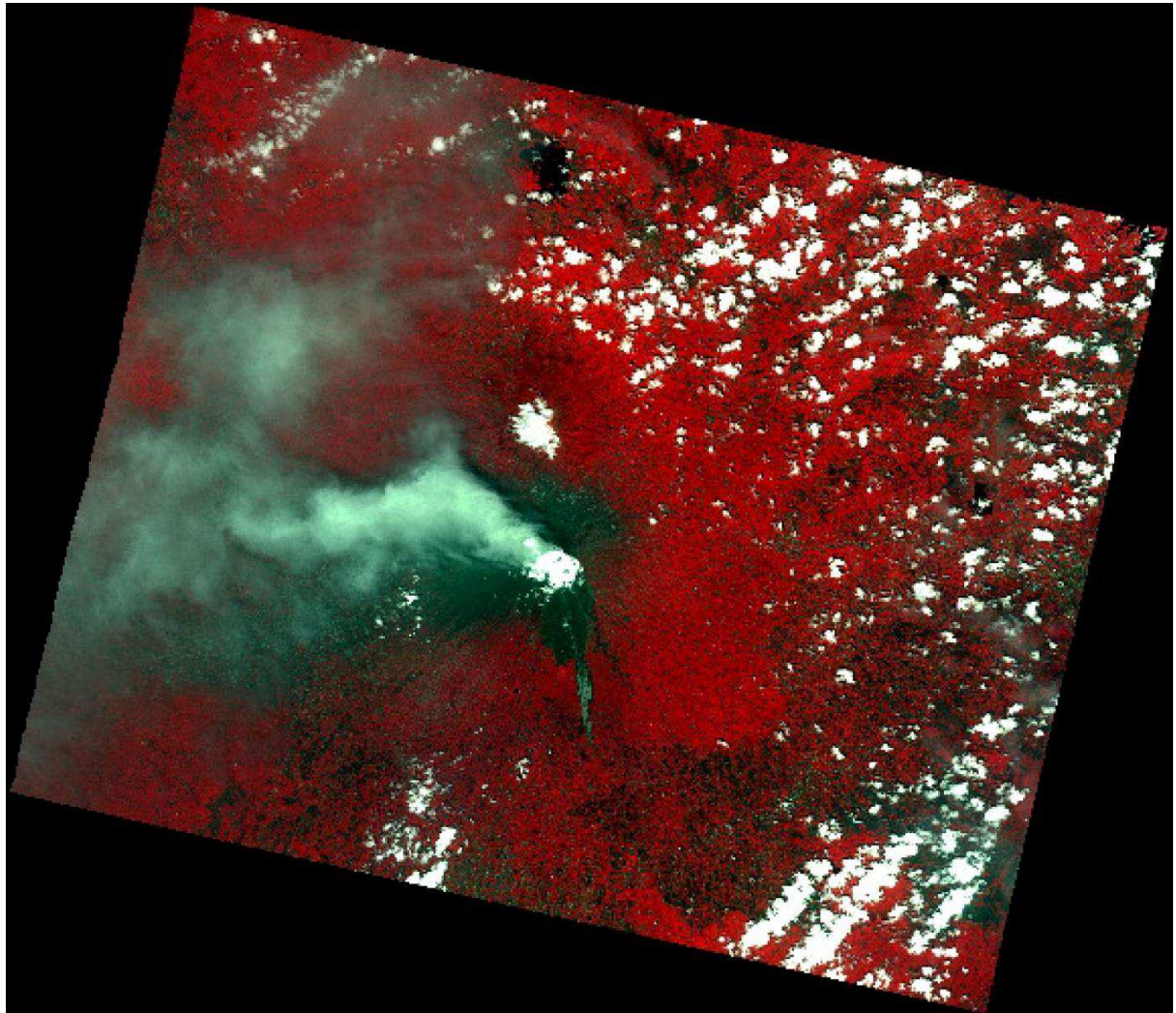


Image Spot 5 prise pendant l'éruption du Merapi, 15 novembre 2010

Chapitre 1 – Cadre géographique, scientifique et problématique

« En dépit des éruptions volcaniques, les populations sinistrées du Merapi sont maintes et maintes retourné vivre sur les terres fertiles du volcan » (Sultan Hamengku Buwono X, Gouverneur de la province de Yogyakarta, 2000).

Parmi l'ensemble des volcans indonésiens, le volcan Merapi tient une place à part compte tenu d'une très abondante littérature scientifique qui a permis, dès l'époque coloniale hollandaise, d'en décrire puis d'en mesurer les styles éruptifs et les principales évolutions de son relief, notamment les variations du cône actif et de ses dômes de lave sommitaux. Cet engouement scientifique depuis les descriptions naturalistes du XVIII^e siècle jusqu'aux modèles volcanologiques du XXI^e siècle est dû d'abord à la grande récurrence des coulées pyroclastiques sur un espace qui a toujours été très peuplé (Voight et al., 2000), nécessitant une surveillance accrue du volcan qui a débuté dès les années 1920. Suite aux scientifiques hollandais et allemands du début du XX^e siècle, (Kemmerling, Neumann van Padang, Schmidt, Hartmann, van Bemmelen), de nombreux géologues étrangers se sont intéressés de près aux phénomènes éruptifs du Merapi, parmi lesquels des Français qui ont participé à une meilleure connaissance de l'histoire morphologique du volcan. H. Tazieff a balisé le sentier de randonnée menant au cratère et a amorcé les fondamentaux d'une étude systématique des gaz (1980), J.-M. Bardintzeff a étudié les coulées pyroclastiques qu'il a classifiées sous le terme « nuées ardentes de type Merapi » (1984), et P.C. Berthommier a rédigé une thèse sur l'évolution structurale de l'édifice (1990), dont les données ont été reprises par Camus et al. (2000). Les volcanologues américains comme B. Voight et C. Newhall ont grandement participé à l'actualisation des connaissances historiques et géologiques du Merapi en coordonnant l'édition spéciale du 100^e numéro du *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2000), entièrement consacré au Merapi. Une synthèse historique des éruptions (Voight et al., 2000) ainsi qu'une révision de la géologie du volcan (Newhall et al., 2000) permettent d'en expliquer le fonctionnement dans le détail, et font du Merapi un espace particulièrement bien connu. Dans les années 2000, les chercheurs allemands tels L. Schwarzkopf (2005) et R. Gertisser (2012), des Néo-Zélandais comme J. Procter, S. Cronin, mais aussi des chercheurs français comme F. Lavigne (1998, 2002, 2008), F. Beauducel (1998), J.-C. Thouret (2000, 2010), S. Charbonnier (2008), C. Gomez (2008), P. Thierry et P. Jousset (2008-2012), J.C. Komorowski (sous presse) ont perpétué l'engouement international pour l'étude des phénomènes volcanologiques du Merapi. Le grand nombre de partenaires scientifiques étrangers ne doit pas masquer les travaux menés par des chercheurs indonésiens, tels Hadikusumo (1969), Wirakusumah (1989), Sayudi (1994), Sri Sumarti et Suryono (1994), Siswamidjono (1995), Andreastuti (2000), Abdurachman (2000) et Surono (sous presse) qui ont notamment publié des articles sur la géophysique et les gaz du volcan dans des revues internationales. Des colloques organisés par les institutions locales (au Sabo Center, en 1995 ; à l'Université Gadjah Mada, en 2011) ont permis à des ingénieurs et chercheurs japonais (Tanaka, 1994 ; Jitousono ou Shimokawa, 1995) d'apporter des études

supplémentaires, notamment en termes de réduction d'impacts des aléas par l'utilisation de barrages à sédiments (*sabo dam*). La littérature universitaire est également particulièrement abondante, concernant généralement des mémoires de master voire des thèses consacrés à tout ou partie du volcan, réalisés dans des universités indonésiennes ou étrangères. Cette tradition internationale amorcée par les Européens est en réalité pluridisciplinaire, et elle regroupe, en plus des études de volcanologie, des enquêtes historiques, archéologiques (Djumarma *et al.*, 1986 ; Newhall *et al.*, 2000), sociales, économiques et anthropologiques. Des chercheurs comme Laksono (1988), Dove (2007, 2008, 2010) ou Donovan (2010) proposent un décryptage des fonctionnements culturels et notamment religieux du volcan. En effet, le Merapi joue un rôle à part entière dans l'histoire javanaise : les royaumes indianisés Sailendra et Sanjaya puis les royaumes (hindouiste puis musulman) de Mataram en ont fait un élément constitutif d'une géomancie locale structurante dans l'organisation de leur territoire. De nombreux temples ont été endommagés ou ensevelis par le matériel rejeté lors des éruptions ou par les lahars (Sambisari, Prambanan). La récurrence des éruptions a favorisé l'émergence d'une figure chamanique qui a été étudiée dans l'optique de mieux saisir les processus de vulnérabilité sociale des habitants du volcan (Lavigne *et al.*, 2008 ; Texier *et al.*, 2009 ; Donovan, 2010).

Le Merapi est ainsi un espace connu, partagé entre les domaines épistémologiques des sciences de la Terre et des sciences humaines dont il permet la synthèse. L'objectif de ce premier chapitre est de présenter l'espace de la présente recherche à la lumière des multiples études qui lui ont été consacré. Cet état de l'art mettra en avant trois éléments. Les formes du relief en lien avec les éruptions seront exposées dans un premier temps, pour esquisser les grandes lignes du contexte géographique, nécessaires à la compréhension de cette thèse. Ensuite, une définition et une présentation des lahars permettra d'en préciser le contexte scientifique, suivies par une présentation des notions fondamentales ainsi que de la problématique qui sera suivie.

I. Le Merapi : un volcan composite insulaire en milieu tropical

On appelle *stratovolcan* un édifice volcanique constitué à la fois de laves et de téphras accumulés par des éruptions successives pendant plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers d'années (Davidson et De Silva, 2000). Il s'agit ainsi d'une forme de relief polygénique (formée par l'accumulation des produits de plusieurs éruptions de natures variées). Dans le cas où la croissance du stratovolcan a été ponctuée par un ou plusieurs effondrements sectoriels et/ou par la formation d'une caldera, on parlera alors plutôt de *volcan composite* (Thouret, 1999 ; Davidson et De Silva, 2000). Le Merapi répond à cette dernière caractéristique, puisque sa structure est nettement ouverte vers l'ouest suite à une ou plusieurs avalanches de débris (Camus *et al.*, 2000 ; Newhall *et al.*, 2000 ; Andreastuti *et al.*, 2000 ; Gomez *et al.*, 2010 ; Gertisser *et al.*, 2012). La première rubrique de ce chapitre vise à présenter les principaux aspects géologiques, volcanologiques et géographiques de l'espace auquel est consacrée la thèse.

1. Un volcan composite connu

1.1 Évolution morphostructurale du volcan

1.1.1 Histoire géologique

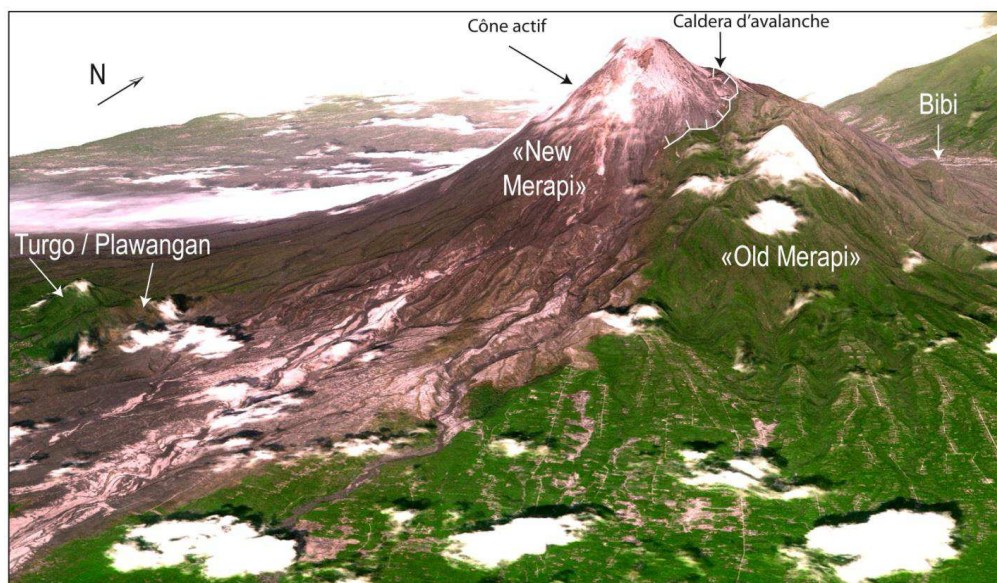


Figure 6 - L'édifice volcanique du Merapi vu du sud-est
(image Spot 5 2010 drapée sur un MNT, Earth Observatory of Singapore, 2011)

Suite à la monographie du Merapi proposée par Van Bemmelen dans sa géologie de l'île de Java (1949), sept références ont contribué à la reconstitution de l'histoire géologique du Merapi dont trois thèses de doctorat (Bahar, 1984 ; del Marmol, 1989 ; Berthommier, 1990), la carte géologique de Wirakusumah *et al.* (1989), et trois articles scientifiques (Camus *et al.*, 2000 ; Newhall *et al.*, 2000 ; Gertisser *et al.*, 2012). Ces différentes études sont toutes fondées sur des analyses stratigraphiques couplées à des datations (^{14}C , K-Ar, Ar-Ar), et montrent une construction de l'édifice en plusieurs phases, dont les bornes chronologiques sont toutefois souvent débattues entre leurs auteurs. La tentative d'histoire géologique proposée dans la thèse de doctorat de P.C. Berthommier (1990) a été partiellement reprise par Camus *et al.* (2000), mais certaines de ses interprétations et datations ont été remises en question par C. Newhall (Tableau 2), dont la vaste synthèse volcanologique, historique et archéologique (2000) reprend plutôt les thèses de Bahar (1984) et de del Marmol (1989). L'étude la plus récente de Gertisser *et al.* (2012) repose sur une nouvelle série d'échantillons et de datations permettant de prolonger les précédentes chronologies, en apportant notamment la révision de certains événements dont la date est conflictuelle, comme celle de l'avalanche de débris qui a emporté le versant occidental de l'édifice. Il confirme en outre les analyses tephrostratigraphiques d'Andreastuti *et al.* (2000) qui suggéraient l'occurrence holocène d'éruptions explosives de grande ampleur (Tableau 2). Hormis leurs désaccords, les chronologies (Tableau 2) montrent toutes que :

- Les interprétations conflictuelles concernent notamment la datation et l'origine de trois collines de dimensions modestes (Figure 6), les monts Turgo et Plawangan (sud) et Bibi (nord).
- La construction de l'édifice s'est faite en deux principales étapes à partir du Pléistocène : l'édification du stratovolcan et la formation du cône actif actuel. L'âge de l'édifice le plus ancien (en-dehors des volcanismes tertiaires pré-Merapi) est pléistocène, max. 170 000 BP.
- Le versant occidental s'est effondré en une volumineuse avalanche de débris de type St. Helens qui a décapité la partie sommitale du volcan en créant une ouverture de la structure orientée vers l'ouest (Figure 6)

Tableau 2 - Histoire géologique du Merapi : aperçu des différentes interprétations et datations

Étape de la construction du Merapi	L'école d'Orléans Berthommier, 1990 Camus <i>et al.</i> , 2000	L'école américaine Newhall <i>et al.</i> , 2000	L'école allemande Gertisser <i>et al.</i> , 2012
<i>Volcanisme tertiaire, anciens édifices périphériques</i>	« Pre-Merapi » ? Mont Bibi (nord du Merapi)	« Pre-Merapi » ? Monts Menoreh (pyroxènes et andésites altérés), Monts Gendol (Muntilan), voir localisation Figure 10.	
<i>Volcanisme pléistocène, édifice pratiquement disparu</i>	« Ancient Merapi » ±40 000 BP-14 000 BP Monts Turgo et Plawangan (sud du Merapi)	« Proto-Merapi » ? Monts Turgo et Plawangan (sud du Merapi)	« Proto-Merapi » ±170 000 BP-30 000 BP Monts Turgo et Plawangan (sud du Merapi) et Mont Bibi (nord).
ÉDIFICATION DU STRATO-VOLCAN TRONQUÉ VERS L'OUEST PAR UN OU PLUSIEURS EFFONDREMENT(S) SECTORIEL(S)	« Middle Merapi » ±14 000 BP-2200 BP Alternance de laves basaltiques-andésitiques et de dépôts pyroclastiques. Entre 6700 BP et 2200 BP : effondrements sectoriels du flanc ouest et formation de la caldera d'avalanche. Les Monts Gendol, près de Muntilan en sont interprétés comme les hummocks.	« Old Merapi » ±10 000 BP-1900 BP Alternance de laves basaltiques-andésitiques et de dépôts pyroclastiques. Mont Bibi (nord du Merapi), interprété comme un cône parasite. Principal effondrement sectoriel du flanc ouest et formation de la caldera d'avalanche à ±1900 BP.	« Old Merapi » ±30 000 BP-6500 BP Alternance de laves basaltiques-andésitiques et de dépôts pyroclastiques. Édifice partiellement détruit par un ou plusieurs effondrements sectoriels du flanc ouest. Caldera d'avalanche datée à 6500 BP.
ÉDIFICATION DU CÔNE ACTIF ACTUEL DANS LA CALDERA D'AVALANCHE	« Recent Merapi » ±2200 BP-1786 AD Éruptions explosives, avec ensevelissement du temple de Sambisari (Figure 7A) à 26 km au sud du volcan au cours du XV ^e siècle.	« New Merapi » ±1900 BP (50-100 AD) - ... Éruptions explosives et ensevelissement du temple de Sambisari (Figure 7A) au cours du XIII ^e siècle. Les auteurs évoquent l'idée que le temple de Borobudur (Figure 7B, 27 km à l'ouest du volcan) ait été bâti sur un lac formé par un barrage temporaire sur le fleuve Progo (idée reprise par Gomez <i>et al.</i> , 2010). Activité volcanique fréquente marquée par la formation de dômes de lave et de leur effondrement.	« New Merapi » ±6500 BP - ... Activité volcanique fréquente marquée par la formation de dômes de lave et de leur effondrement. Approche renouvelée des rythmes éruptifs et des risques associés par la mise en évidence d'éruptions explosives avec coulées pyroclastiques de grande extension.
	« Modern Merapi » 1786 AD -... Activité volcanique fréquente marquée par la formation de dômes de lave et de leur effondrement.		

Vu du sud, le Merapi montre du côté oriental les restes du *Old (Middle) Merapi*, tronqués par la caldera d'avalanche (*somma rim*), et surmontés du côté occidental par le cône actuel (Figure 6). Si l'occurrence d'une avalanche de débris ne fait pas de doute, sa datation précise demeure en revanche hasardeuse. Camus *et al.* (2000) et Gertisser *et al.* (2012) argumentent en faveur d'un effondrement survenu vers 5 000 BP, avant la date avancée par Newhall *et al.* (Tableau 2).

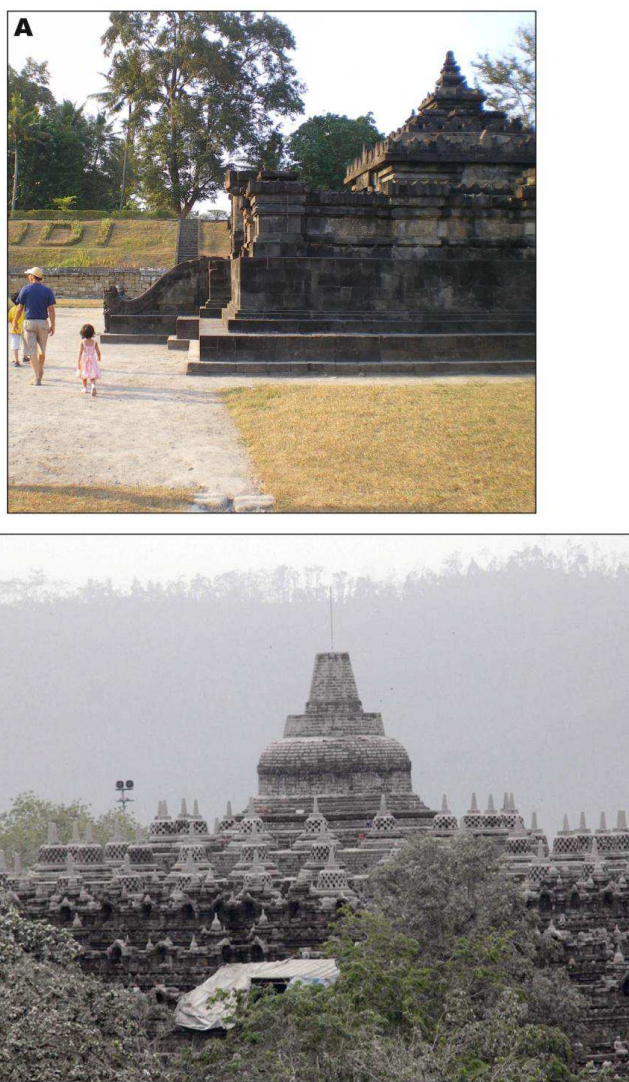


Figure 7 - La date de construction des temples (IX^e-XII^e siècles) et de leur ensevelissement partiel ou total permet de caler la chronologie récente de l'activité du Merapi. A : Sambisari (IX^e s.) recouvert par 40 cm de cendres et 6 m de dépôts fluviaux, cliché E. de Bézilal, août 2008 ; B : Borobudur (IX^e s.), ici recouvert par une fine couche de cendres lors de l'éruption de 2010, cliché : anonyme, 2010).

1.1.2 Géomorphologie de l'édifice

Le matériel émis par un volcan composite est varié. On appelle *volcanogénique* l'ensemble des matériaux d'origine volcanique. Parmi eux, le matériel « éruptif » fait référence aux éléments mis en place par une éruption (lave ; téphras déposés par retombées aériennes ou par les flux pyroclastiques). Le terme « volcanoclastique » a une acceptation plus large (Figure 8), et désigne tout débris d'origine volcanique, éruptif ou non. Le mode de fragmentation peut-être éruptif (dans le cas du matériel pyroclastique), mais peut aussi être lié à l'érosion sur les flancs du volcan (Thouret, 1999 ; Davidson et Da Silva, 2000 ; Carey, 2000).

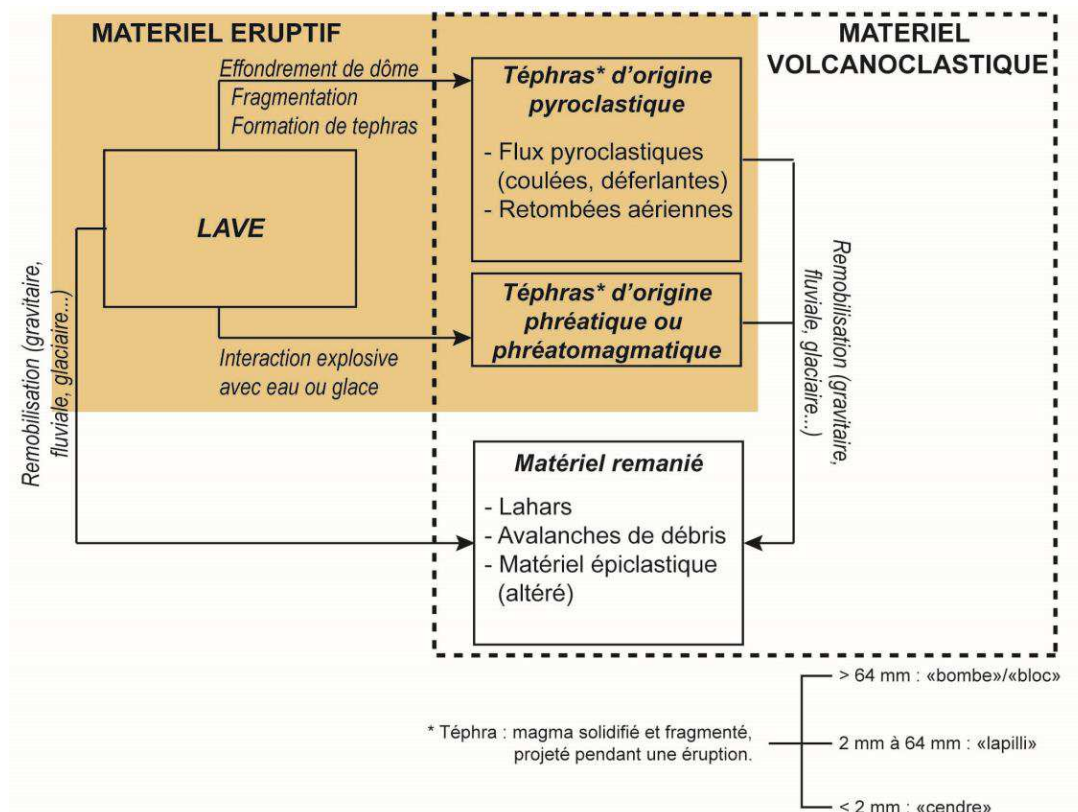


Figure 8 - Le matériel volcanogénique (modifié de Davidson et Da Silva, 2000)

Dans la géomorphologie d'un volcan composite tel que le Merapi, les différents types de matériel volcanogénique sont organisés en une structure concentrique ayant pour centre commun le conduit d'où s'échappe le magma (Figure 9). On peut ainsi distinguer deux grands domaines morphologiques au Merapi, localisés sur les versants occidental et méridional du volcan :

- Le premier est directement lié aux rythmes de formation et de destruction du cône et donc aux éruptions. Ce secteur est marqué par des dômes de lave et par la formation de cratères dans la zone sommitale. Il s'agit de la zone source du matériel volcanogénique (Figure 9). Les coulées et déferlantes pyroclastiques qui ont accompagné les fréquentes éruptions d'effondrement des dômes de la zone source au XX^e siècle ont déposé du matériel pyroclastique sur les fortes pentes en contrebas du cône. Il s'agit du talus proximal du volcan (Figure 9), marqué par les dynamiques éruptives du Merapi, et s'étendant jusqu'à 5 à 6 km depuis la zone source (Figure 10).
- Le second domaine morphologique en revanche n'est pas systématiquement touché par les éruptions, hormis les épisodes centennaux de grandes magnitude et intensité. Il s'agit d'un large tablier volcanoclastique s'étendant jusqu'au fleuve Progo et à l'agglomération de Yogyakarta, et formant une *ringplain* par aggradation du matériel provenant du premier domaine morphologique (Figure 9). Transporté par des processus de transfert massifs et rapides (lahars, essentiellement), le matériel volcanoclastique circule et s'accumule sur deux grands talus distingués d'abord par leurs pentes (Figure 9) : talus médial (pente entre 4% et 7%, au moins 5 m d'engrèvement des réseaux hydrographiques) et talus distal (pente < 4 % et faible engrèvement des cours d'eau, avec tendance au débordement en cas de lahars). Le talus médial s'étend jusqu'à 12-15 km depuis la zone source, le talus distal jusqu'à près de 30 km vers l'ouest et vers le sud (Figure 10). La remobilisation, le transport et la déposition volcanoclastiques sont des éléments essentiels de la construction des volcans composites en auroles concentriques depuis le conduit volcanique principal.

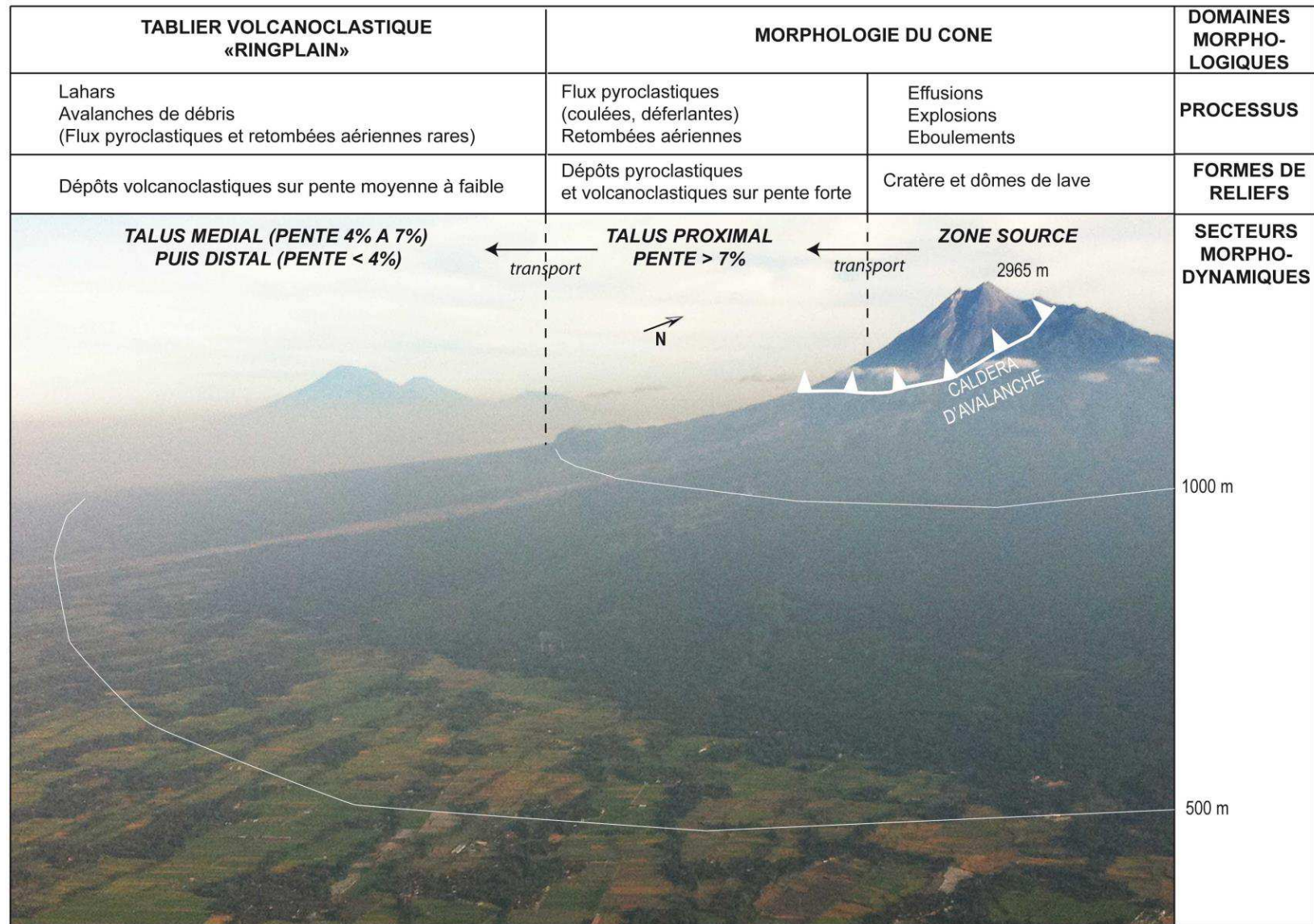


Figure 9 - Aspects géomorphologique de l'édifice du Merapi (cliché E. de Bélizal, mai 2012)

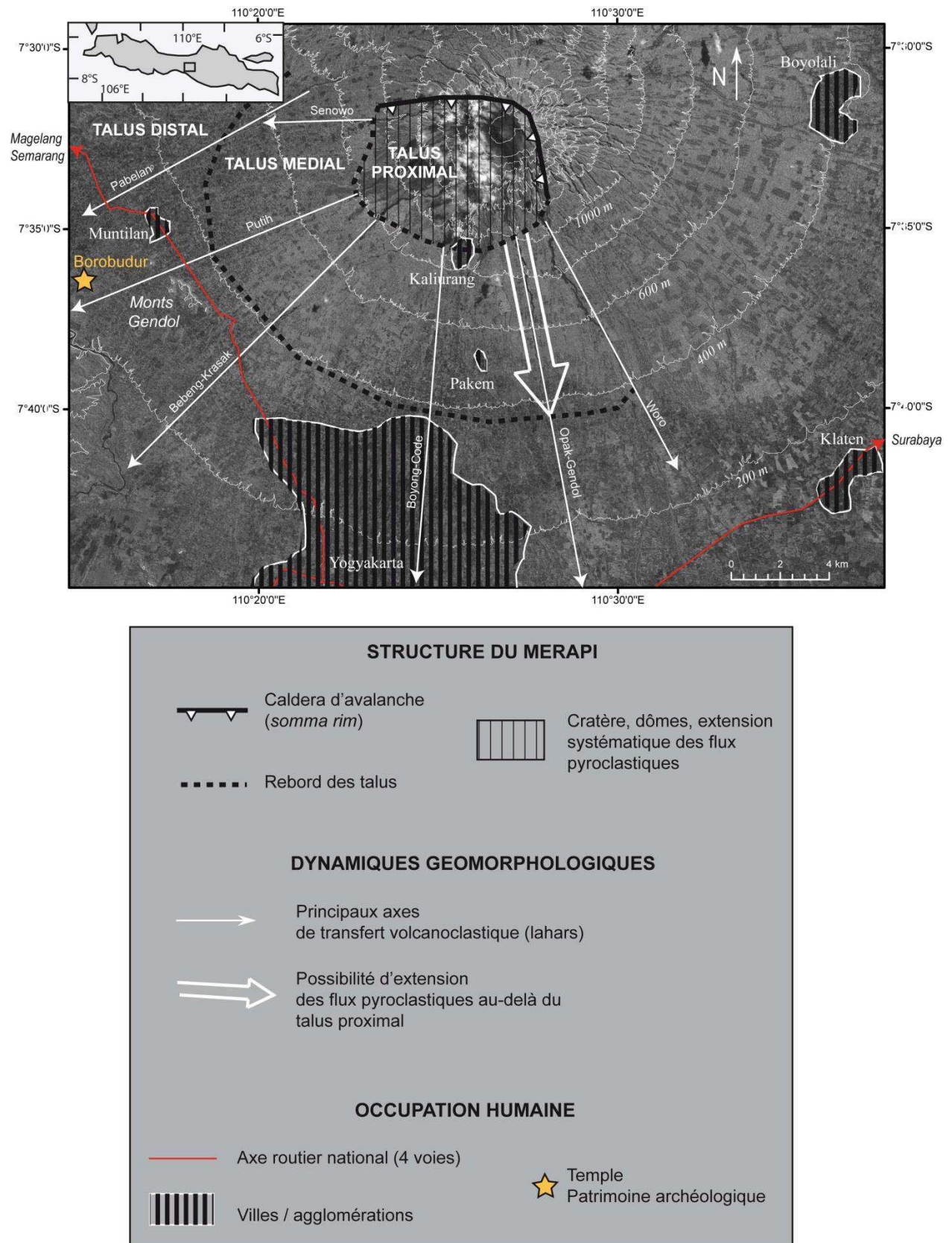


Figure 10 - Contexte structural, dynamique et géographique du volcan Merapi
(source : image Spot 5, 17 mai 2008)

1.2 Aléas et éruptions du Merapi

1.2.1 Les aléas volcaniques éruptifs

Le nombre de victimes des éruptions du Merapi depuis le milieu du XVI^e siècle s'élève à environ 7 500 tués (Thouret *et al.*, 2000 ; Suroño *et al.*, *sous presse*). La principale menace réside dans l'occurrence, quasi-systématique en cas d'éruption, des coulées et des déferlantes pyroclastiques, autrefois nommées « nuées ardentes » par Lacroix (1904) après l'éruption de la Montagne Pelée (Martinique). Le terme de « nuées ardentes » se retrouve d'ailleurs dans la quasi-totalité des publications consacrées au Merapi jusqu'au début des années 2000. On regroupe aujourd'hui plus volontiers ces processus sous le terme de *pyroclastic density current* - PDC (flux pyroclastique). Il s'agit d'un mélange de téphras (magma fragmenté et solidifié lors de son éjection) et de gaz, transportés par gravité le long des pentes d'un volcan à des vitesses pouvant excéder 100 m/s et à une température de plusieurs centaines de degrés (Fisher et Schmincke, 1984 ; Fisher, 1995 ; Nakada, 2000 ; Wilson et Houghton, 2000 ; Voight et Davis, 2000).

On distingue deux grands processus de transport pyroclastique. La coulée (*pyroclastic flow*) est caractérisée par un flux concentré de matériel solide dont la quasi-totalité de la masse est située à sa base, laquelle est contrainte par les aspérités de la surface. Les coulées pyroclastiques sont donc généralement guidées par le réseau hydrographique. Leurs dynamiques d'écoulement sont complexes, et sont notamment marquées par un phénomène d'élutriation des particules les plus fines et les moins denses : les gaz chauds qui accompagnent l'émission d'un PDC réchauffent l'air environnant et permettent la mise en suspension des particules fines au-dessus de l'écoulement basal constitué de blocs (Thouret *et al.*, 2010). Il se forme ainsi un nuage cendrex flottant (*buoyancy plume*) au-dessus de la coulée, souvent nommé « ash-cloud » (nuages de cendres), à l'origine du terme de « nuée ardente » (Wilson et Houghton, 2000). Il est parfois appelé « panache co-ignimbritique » lorsqu'il se développe verticalement (Figure 11, Carey et Bursik, 2000). Dans le cas d'une déferlante (*pyroclastic surge*), il s'agit d'un flux plus dilué et à faible concentration en matériel solide ; les dynamiques d'écoulements sont principalement représentées par la suspension turbulente des matériaux les plus fins, et la saltation des plus grossiers. Les déferlantes ne sont ainsi pas contraintes par la surface, et elles peuvent balayer des interfluves (Fisher et Schmincke, 1984 ; Valentine et Fisher, 2000 ; Wilson et Houghton, 2000). Lorsque les déferlantes sont propulsées par un souffle d'origine explosive, notamment dans le cas de l'expansion latérale d'une colonne éruptive, on parle alors de *blast* (Valentine et Fisher, 2000). La vitesse des PDC, leur forte température, le matériel grossier que transportent les coulées associés aux éléments volatils des *ash-clouds* ou des déferlantes provoquent de graves brûlures souvent mortelles, et dévastent également les habitations et infrastructures qu'elles rencontrent (Nakada, 2000 ; Baxter, 2000, 2011 ; Spence *et al.*, 2004).

L'origine des flux pyroclastiques a une certaine influence sur leur extension. Au Merapi, ils sont provoqués par des éruptions explosives, ou bien par l'effondrement d'un dôme de lave. Dans le premier cas, il s'agit surtout de déferlantes provoquées par l'affaissement d'une colonne éruptive vulcanienne ou plinienne pouvant atteindre des extensions jusqu'à 15 voire 20 km (> 20 km dans le cas d'une éruption plinienne) ; dans le second cas, la destruction d'un dôme ne provoque que des coulées dites « à blocs et à cendres » (*block-and-ash flow*) ne dépassant pas les 8 km, et canalisées par le réseau hydrographique. C'est ce dernier type, particulièrement fréquent au XX^e siècle, qui a été parfois défini comme « nuée ardente de type Merapi » au risque d'occulter l'occurrence de coulées et de déferlantes plus volumineuses lors de phases explosives (Bardintzeff, 1984 ; Voight *et al.*, 2000). Enfin, Abdurachman *et al.* (2000), Lube et Cronin (2008), Thouret *et al.* (2010) rappellent que dans certains cas, la dissociation entre la coulée pyroclastique et le nuage cendrex qu'elle entraîne peut conduire à la séparation du flux en deux : les éléments grossiers demeurent contraints dans le fond de

vallée, tandis que le nuage forme une déferlante sur les interfluves (Fisher, 1995). En 1994, une coulée pyroclastique dévalant le long de la rivière Boyong (versant sud du Merapi) a heurté la colline de Turgo ; il en a résulté la désolidarisation de la partie moins dense du flux qui n'a plus suivi la coulée, mais s'est répandu dans le village de Turgo où elle a causé une trentaine de morts. En 2006, c'est le village de Kaliadem, le long de la Gendol, qui a été frappé par une avulsion du nuage de cendres (*ash-cloud*) d'une coulée pyroclastique dont l'écoulement a été perturbé par la présence d'un barrage, causant la mort de deux personnes.

Les autres aléas éruptifs associés au volcanisme explosif comme les retombées aériennes sont plus rares, et représentent une menace moindre que les coulées et les déferlantes pyroclastiques au Merapi, même si leur occurrence est particulièrement dommageable pour l'agriculture et la ressource en eau.

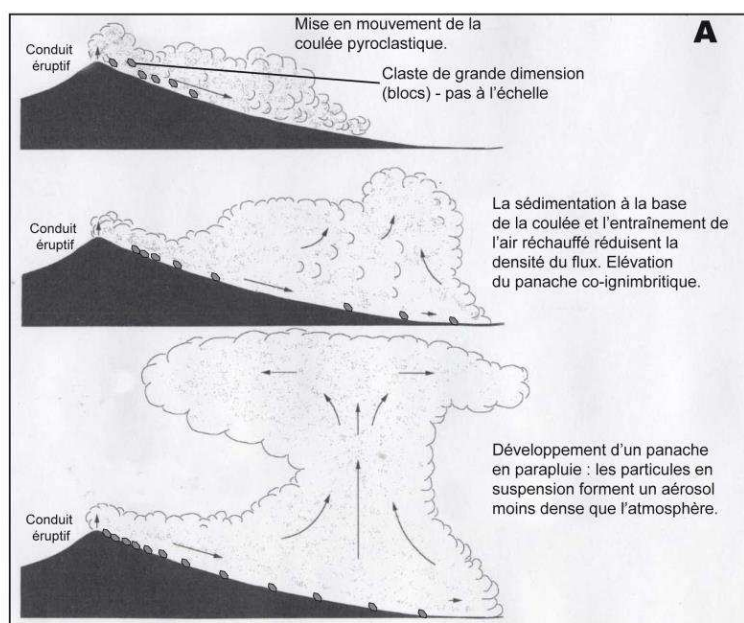


Figure 11 - Fonctionnement et exemple de coulée pyroclastique

A : explication théorique de l'évolution d'une coulée pyroclastique, modifié de Carey et Bursik, 2000 ;
 B : coulée pyroclastique dont l'*ash-cloud* se développe en panache co-ignimbrique, photographiée le 1^{er} novembre 2010 lors de l'éruption du Merapi, source inconnue.

1.2.2 Les éruptions

- Les éruptions historiques

61 éruptions survenues depuis le milieu du XVI^e siècle ont été formellement identifiées (Thouret *et al.*, 2000 ; Voight *et al.*, 2000). Les chroniques historiques javanaises mentionnent des éruptions historiques remarquables (celle de 1664 notamment), mais leur description reste lacunaire et très souvent anecdotique, sinon quasiment légendaire comme l'éruption de 1006, qui aurait sévèrement compromis la prospérité du royaume javanais local (Djumarma *et al.*, 1986 ; Newhall *et al.*, 2000). En dépouillant les chroniques coloniales, Voight *et al.* (2000) ont montré l'abondance de la production scientifique consacrée au Merapi, qui a suscité l'intérêt des naturalistes européens depuis au moins la fin du XVIII^e siècle (voir les bibliographies de Kemmerling, 1931 ; Schmidt, 1934 ; Neumann van Padang, 1933 et 1951 ; Hartmann, 1935 et de Voight *et al.*, 2000, qui font référence à de nombreux rapports anonymes datant pour les plus anciens des années 1790). Les éruptions sont décrites dès le milieu du XIX^e siècle, puis étudiées de manière scientifique après 1930, et permettent d'obtenir une riche information sur l'évolution des phénomènes éruptifs et de la morphologie du cône actif (Van Bemmelen, 1949 ; Neumann van Padang, 1951). Sur l'ensemble de la chronologie s'étendant depuis 1768 jusqu'à 1998 peuvent être distinguées deux périodes. Avant et pendant le XIX^e siècle, les éruptions étaient essentiellement explosives, avec émission d'une colonne éruptive verticale et émission de retombées aériennes qui ont en 1849 affecté les aires urbaines de Yogyakarta et Solo. Les évidences stratigraphiques d'Andreastuti *et al.* (2000) et de Gertisser *et al.* (2012) montrent ainsi que des éruptions de forte intensité et de magnitude élevée sont avérées. Des dépôts de retombées aériennes ponceuses de grande extension ont été relevées (Gertisser *et al.*, 2012), et suggèrent que le Merapi a pu connaître des épisodes éruptifs explosifs subplinien avant le XIX^e siècle (1664). En revanche, tout au long du XX^e siècle et jusqu'en 2006 (Charbonnier et Gertisser, 2008), les dynamiques éruptives étaient davantage liées à l'accumulation effusive de lave visqueuse sur la partie sommitale du volcan, formant un dôme dont la destruction ultérieure (quelques semaines à quelques années après) provoquait des coulées pyroclastiques d'extension plus réduite que celles induites par une éruption explosive. Les effondrements de dômes ont été très fréquents au XX^e siècle, avec une récurrence d'environ 4 à 6 ans (Thouret *et al.*, 2000 ; Surono *et al.*, *sous presse*). Trois épisodes majeurs et mieux connus se distinguent de cette chronologie et sont reconnus comme les trois éruptions principales du Merapi depuis 200 ans. En 1872, une violente explosion, entendue jusque sur l'île de Madura 370 km au nord-est, décapita entièrement le dôme construit entre 1867 et 1871. En 1930-1931, des coulées et déferlantes pyroclastiques ont détruit 13 villages, tué 1369 personnes et anéanti une surface de 20 km² (Voight *et al.*, 2000). Enfin, en 2010, une éruption explosive majeure, rejoignant l'intensité de celle de 1872, a été associée à une éruption « centennale ».

- L'éruption de 2010, un événement centennal

En octobre-novembre 2010, l'éruption explosive a rejeté entre 0,03 et 0,06 km³ de matériel pyroclastique. Des retombées aériennes (0,01 à 0,02 km³) ont notamment affecté Yogyakarta et Muntilan, ce qui ne s'était pas produit depuis plus de 150 ans (Surono *et al.*, *sous presse*). Les coulées et déferlantes pyroclastiques ont atteint 17 km depuis le cratère, ce qui correspond au double de la plupart de celles qui se sont déroulé au XX^e siècle, et ont dévasté les abords de la rivière Gendol. Après une phase d'intrusion qui a débuté en novembre 2009 jusqu'en octobre 2010, l'éruption a commencé de manière explosive le 26 octobre 2010 (Tableau 3), ce qui ne s'était pas produit tout au long du XX^e siècle. Pendant la phase magmatique, l'accumulation lavique a été très rapide, près du double des formations de dômes au XX^e siècle, et accompagnée par d'abondantes émissions gazeuses (0,44 Tg SO₂) et d'un grand nombre de séismes (Surono *et al.*, *sous presse*).

L'ascension rapide du magma riche en gaz a posé d'importants problèmes d'évacuation et un réajustement des zones de danger, initialement prévues pour des flux pyroclastiques de moindre extension, courants jusqu'en 2006. Au total, l'éruption a détruit 2300 maisons et causé 644 victimes dont 367 morts (Suroño *et al.*, sous presse), principalement par asphyxie et brûlures mortelles dues aux coulées et déferlantes pyroclastiques, ce qui en fait la plus meurtrière depuis 1931. Plus de 400 000 personnes ont été évacuées. L'intensité et la magnitude de l'éruption, ses phases effusives et explosives, la rendent assez comparable à celle de 1872 ; elle est identifiée comme un événement centennal (Suroño *et al.*, sous presse ; Pallister *et al.*, sous presse).

Tableau 3 – Phases de l'éruption du Merapi en 2010 et phénomènes associés (données de Suroño *et al.*, sous presse)

Phases	Date	Phénomènes
Explosive	26/10/2010 01/11/2010	Colonne éruptive verticale (12 km) PDC (extension 8 km, Gendol et Kuning) : 35 morts Explosions suivantes des 29 et 31 octobre puis 1 ^{er} novembre ont entièrement détruit le dôme de 2006. Ouverture d'une brèche dans le cratère dans la direction de la Gendol.
Magmatique	01/11/2010 07/11/2010	Dynamique effusive avec rapide formation de dôme ($25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) Explosions les 3 et 4 novembre accompagnées par des PDC jusqu'à 12 km (3 novembre) et 17 km (nuit du 4-5 novembre) tuant plus de 200 personnes. Le nouveau dôme est détruit. Nouvelle phase effusive le 6 novembre ($35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$)
Diminution	08/11/2010 23/11/2010	Diminution de l'activité sismique et fin de la croissance du dôme. Décroissance progressive de l'activité ; fin de la situation d'urgence le 3 décembre.

2. Un milieu à risque

2.1 Dynamiques socioéconomiques et culturelles

Les très fortes densités de population de l'île de Java, dépassant 950 hab./km² à l'ouest et au centre de Java dans un contexte encore moyennement urbanisé (De Koninck, 2005 ; Goldblum et Franck, 2007 ; Franck, 2010) favorise la colonisation des massifs volcaniques javanais. Les abords de la caldera de Dieng sont ainsi dévolus à des cultures sèches en terrasse sur plusieurs centaines de mètres de dénivelé, et des plantations de tabac s'étendent sur des centaines d'hectares sur les hauts versants du volcan Sindoro (Lavigne *et al.*, 2008). Les rizières irriguées en terrasses occupent la totalité des flancs du Merapi jusqu'aux isohypses 800-900 m. Dans la partie septentrionale du volcan, abritée des intempéries par la présence du Merapi et par celle du volcan Merbabu, les cultures maraîchères se déploient jusqu'à 2000 m d'altitude sur des terroirs aménagés sur les reliques du « Old Merapi ».

Les flancs du Merapi sont habités par 1,3 million de personnes vivant dans 300 villages (*dusun*). On estime à 570 899 le nombre de personnes habitant dans la zone d'extension des flux pyroclastiques, dont 53 318 dans l'espace théoriquement interdit à toute occupation humaine (données MIA VITA). Les villages du Merapi sur le flanc sud sont aménagés jusqu'à 4 km du cratère. La plupart des habitants du Merapi (60%, données du recensement de 2010) sont des agriculteurs dont les revenus demeurent modestes (15 000 IDR/jour, soit 1 €), avec un accès à la terre de plus en plus réduit à mesure que la population se densifie. Le taux de chômage avoisinant 14% rend également les

conditions de vie difficiles pour les habitants. La présence d'un golf au sud du volcan, de plusieurs auberges à Kaliurang, de multiples points de vue sur le cône actif et d'un chemin de randonnée facile d'accès pour rejoindre le cratère font du Merapi un objet touristique, dont les bénéfices permettent de faire vivre ses habitants (guides, chauffeurs, restaurateurs...) en leur apportant un complément de revenus.

Si le Merapi, à l'instar des autres volcans javanais, est un espace densément peuplé et aménagé, sinon attractif de par la qualité des sols, il possède également une dimension culturelle particulière, trouvant ses origines dans les traditions historiques et religieuses javanaises de la culture *kejawen*. On en trouvera une explication exhaustive notamment chez Laksono (1988), Dove (2007, 2008, 2010), Lavigne *et al.* (2008) et Texier *et al.* (2009). La proximité des sites archéologiques de Borobudur et Prambanan (*stupa* bouddhiste et *prang* shivaïtes) bâtis à l'époque des royaumes indianisés Sailendra puis Sanjaya (VIII^e-X^e siècles), témoigne effectivement de cette occupation ancienne, rythmée du reste par les éruptions explosives (Tableau 2, Figure 7A et B). À partir du XVII^e siècle, le royaume musulman de Mataram centré autour de Yogyakarta a sauvegardé et pérennisé durablement les mythes *kejawen*. Chaque année, des offrandes sont amenées en grande cérémonie par le sultan de la région spéciale de Yogyakarta en compagnie du *juru kunci*, qui est le « gardien des clés » du volcan. Cette figure chamanique représente le lien mystique entre le monde tangible des hommes et les forces immatérielles des esprits, reliquat d'un animisme ancestral que les monothéismes tardifs (l'islam, arrivé sur Java au XV^e siècle, et, dans une moindre mesure, le christianisme diffusé par les Hollandais à partir du XIX^e siècle) n'ont pas effacé. Le *juru kunci* bénéficie d'une aura (Prasetyo, 1998) qui peut parfois faire office de contre-pouvoir en cas d'urgence : en 2006, son refus d'évacuer a influencé d'autres personnes qui ont préféré suivre son exemple et ne pas abandonner leur village (Lavigne *et al.*, 2008). Ce type de conduite a finalement causé la mort d'une vingtaine de personnes dont le chaman lui-même en octobre 2010, restés au village de Kinahrejo situé à 4 km du cratère au sud du Merapi et balayé par les premières coulées pyroclastiques de l'éruption. Si son influence effective demeure surtout circonscrite au versant sud du volcan correspondant à la région spéciale de Yogyakarta (Texier *et al.*, 2009), elle témoigne néanmoins de la persistance d'une très ancienne tradition unissant les Javanais à un volcan qui a toujours été occupé, et dont l'activité est supposée résonner en lien avec le monde des hommes. Dove (2008) démontre d'ailleurs que ses éruptions coïncident, dans l'imaginaire local, avec les principaux événements politiques qui ont marqué l'histoire javanaise puis indonésienne. Van Bemmelen (1949) avait ainsi supposé qu'une éruption majeure en 1006 AD (contestée par Newhall *et al.*, 2000 et Gertisser *et al.*, 2012) aurait été à l'origine du déclin des royaumes indianisés de Java Centre, auxquels a succédé Majapahit, situé sur l'est de Java. La révolte de Diponegoro contre les colons hollandais s'est accompagnée d'explosions de forte intensité (1822), de même que les éruptions de 1994 et 1998 ont coïncidé avec l'affaiblissement du régime autoritaire de Suharto, contraint d'abandonner la présidence du pays après les révoltes de 1998. Dans l'imaginaire local étudié par Dove (2008), le Merapi semble accompagner les sursauts politiques indonésiens.

Le Merapi tient ainsi une place à part dans la culture de ses habitants, et constitue un espace complexe où la densité démographique, les conditions économiques parfois précaires et l'attachement culturel contrebalancent la répulsion que les aléas volcaniques provoqués par les fréquentes éruptions pourraient induire. Celles-ci sont particulièrement surveillées et étudiées, et, preuve de sa singularité, le Merapi est le seul volcan indonésien à bénéficier d'un centre de volcanologie qui lui est presque entièrement dédié, le BPPTK (*Balai Penyelidikan dan Pendidikan Teknologi Kenungapian* – Centre d'études volcanologiques).

2.2 Gestion des éruptions volcaniques

Le système d'alerte indonésien pour les crises volcaniques est placé sous la responsabilité du PVMBG (*Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi* – Centre de Volcanologie et de réduction des catastrophes géologiques), organisme public situé à Bandung (Java-Ouest). Après l'éruption meurtrière du volcan Kelut en 1919, ayant causé la mort de plus de 5 000 personnes, l'administration hollandaise avait mis en place dès septembre 1920 le *Vulkaan Bewakingsdienst* (Office de Surveillance des Volcans). En 1922, cet organisme devint le *Vulkanologisch Onderzoek* (Recherche Volcanologique), qui, jusqu'en 1941, a fait bâtir huit observatoires permanents sur les flancs des volcans de Java les plus actifs, comme le Merapi, le Semeru ou encore le Kelut. Cette première surveillance de l'activité volcanique s'est depuis étendue à la quasi-totalité des volcans actifs indonésiens, sous la responsabilité du PVMBG. Le BPPTK de Yogyakarta centralise les mesures géophysiques provenant des cinq observatoires situés sur les pentes du volcan, et devient le quartier général de la gestion de crise, inféodé au PVMBG de Bandung.

Celle-ci repose sur un mode de gestion avant tout aléa-centré, préconisant l'évacuation systématique des personnes résidant dans un périmètre de moins de 10 km du cratère (Thouret *et al.*, 2000 ; Lavigne *et al.*, 2008). Dove (2008) ainsi que Texier *et al.* (2009) ont montré la limite de ce mode de gestion de crise qui ignore la problématique de la vulnérabilité et de l'accès aux ressources (Gaillard, 2008). Les évacuations sont souvent refusées par les habitants, car elles impliquent l'abandon des sources de revenus et des moyens de subsistance (Texier *et al.*, 2009). En outre, la décision d'évacuation pouvait se prolonger au temps du régime de Suharto par une transmigration autoritaire vers les fronts pionniers de Sumatra, de Kalimantan ou des Célèbes (Laksono, 1988 ; Sevin, 2001 ; Dove, 2008). Les flux de transmigration subsistent toujours aujourd'hui, mais sont volontaires et non plus contraints (Picquout, *thèse en préparation*).

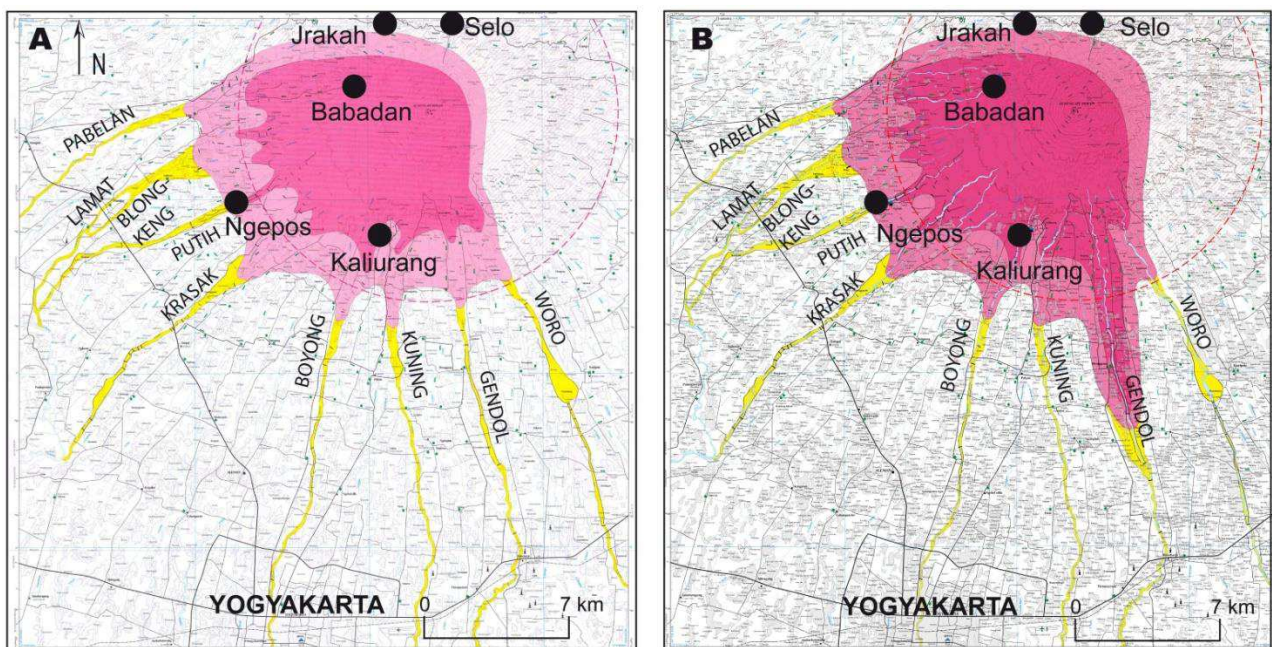


Figure 12 – Exemples de l'évolution de la « cartes des risques » publiées par le PVMBG (A : 2002 ; B : 2011). Rose vif : zone d'exposition maximale aux aléas éruptifs (flux pyroclastiques notamment, émissions gazeuses, projections), évacuations prioritaires. Rose pâle : zone susceptible d'être touchée par les aléas éruptifs en cas d'éruption centennale, évacuations en fonction de l'intensité de l'éruption. Jaune : rivières dans lesquelles peuvent se produire des lahars. Cercle en pointillés rouges : extension possible des projections de téphras de diamètre > 2 mm. En points noirs : les observatoires du volcan. Remarquer le prolongement des zones d'exposition aux aléas éruptifs le long de la Gendol, suite à l'éruption de 2010.

Le zonage des espaces « à risque » est en réalité un zonage des extensions probables des différents aléas, actualisé après chaque éruption (Figure 12). La carte ainsi produite ne correspond donc pas à la spatialisation de scénarios potentiels, mais est une estimation *a posteriori* des secteurs menacés. En 2010, les PDC émis par l'éruption explosive ne correspondaient pas à ce que la carte « de risque » de l'époque préconisait (Figure 12A). Ainsi, le PVMBG a régulièrement modifié le périmètre limite d'évacuation, le prolongeant finalement à 20 km autour du cratère, ce qui a pu provoquer des confusions et une inévitable précipitation (Mei et Lavigne, 2012). Malgré tout, Surono *et al.* (sous presse) ont montré d'un autre côté que la surveillance continue du volcan a permis de s'adapter avec une certaine rapidité aux évolutions des différentes phases de l'éruption, et de permettre l'évacuation de plus de 400 000 personnes. La question de la gestion de crise pour les éruptions futures demeure toutefois en suspens à l'heure actuelle, car de nombreux scientifiques, à commencer par le directeur du PVMBG (Surono *et al.*, sous presse) se demandent si l'éruption de 2010 ne marque pas un retour aux éruptions explosives du XIX^e siècle. Auquel cas, la stratégie serait à revoir, puisqu'elle correspond actuellement plutôt, dans ses modes d'organisation, à des styles éruptifs d'effondrement de dôme associés à des flux pyroclastiques d'extension inférieure à 10 km.

La qualité de la surveillance du Merapi, supportée par de nombreux partenariats étrangers, en fait l'un des volcans les mieux surveillés du monde. D'après Voight *et al.* (2000), le matériel de mesure (sismographes) est perfectionné en 1957, puis en 1982 par l'USGS. Du matériel supplémentaire est installé dans les années 1990 : une station d'enregistrement est développée par les Français en 1991, puis RSAM (Real-time Seismic Amplitude Monitoring) et SSAM (Seismic Spectral Amplitude Monitoring) par l'Université de Penn State. En 1995, enfin, des systèmes d'acquisition de données (hardware et software) sont mis en place par l'USGS/USAID Volcano Crisis Assistance Team (VCAT). Quant aux déformations, elles sont enregistrées par EDM (Electronic Distance Measurements). Les mesures acoustiques et les tiltmètres sont également employés (Français, Japonais, PVMBG).

Le volcan du Merapi est ainsi un espace connu, étudié dans ses propriétés à la fois physiques et anthropiques depuis plusieurs siècles. La présente thèse ne propose donc pas l'investigation exploratoire d'un espace ou de processus méconnus, mais s'ancre au contraire dans une tradition d'études à laquelle l'Université française a beaucoup participé. C'est sur un terrain préalablement densément balisé et connu que porte cette étude, et notamment sur l'une de ses caractéristiques morphodynamiques principales : les lahars.

II. Les lahars comme aléa volcanique syn- et post-éruptif

1. Terminologie et mécanismes

1.1 Origine et déclenchement

Le terme indonésien « lahar » désigne un mélange de matériaux volcanoclastiques transportés par de l'eau, circulant dans le lit des rivières radiales d'un édifice volcanique et pouvant parcourir une distance de plusieurs dizaines de kilomètres (Smith et Lowe, 1991 ; Vallance, 2000). Il s'agit d'un écoulement rapide, très concentré en charge solide de toutes tailles ; ses caractéristiques rhéologiques diffèrent des écoulements fluviaux et correspondent aux coulées de débris et aux écoulements

hyperconcentrés (Smith et Fritz, 1989 ; Vallance, 2000). En transportant le matériel déposé par les éruptions depuis le talus proximal vers le talus distal d'un volcan, les lahars participent activement à la géomorphologie volcanique (stratovolcans et cônes notamment), à l'équilibre de leur pente et à la formation de la *ring plain* aux pieds de l'édifice. Un lahar est caractérisé par sa magnitude (volume transporté et distance parcourue) et son intensité (débit, et notamment le débit de pointe). Il existe deux grands types de lahars, distingués en fonction de leur mode de déclenchement : les lahars synéruptifs et les lahars postéruptifs. Cette rubrique vise à présenter les principales caractéristiques de ces écoulements.

1.1.1 Les lahars synéruptifs

Il s'agit d'un mode de transfert de matériel volcanogénique depuis le cratère vers le bas des versants pendant le temps d'une éruption. Dans ce cas, l'eau nécessaire à la mobilisation des téphras peut provenir de la fusion d'un glacier sommital ou d'une couverture neigeuse. La littérature scientifique consacre plusieurs études de cas de ce type de lahars à travers les exemples du Nevado del Ruiz, en Colombie (Pierson *et al.*, 1990 ; Thouret *et al.*, 1990 ; Verstappen, 1992), du Popocatepetl au Mexique (Muñoz-Salinas *et al.*, 2007, 2009 Huggel *et al.*, 2008 ; Tanarro *et al.*, 2010), du Cotopaxi en Équateur (Aguilera *et al.*, 2003) ou encore du St. Helens (Scott, 1988 ; McEwen et Malin, 1989 ; Waite *et al.*, 1983) et du Mont Rainier aux États-Unis (Schilling, 1998 ; Hoblitt *et al.*, 1998 ; Scott et Vallance, 1995 ; Driedger et Scott, 2008). En Antarctique, en Amérique du Nord mais principalement en Islande, les lahars causés par des éruptions sous-glaciaires sont parfois appelés *jökulhaup*² (Rodolfo, 2000).

La rupture brutale d'un lac de cratère peut également fournir les volumes d'eau pouvant entraîner le matériel magmatique fraîchement émis ainsi que des fragments lithiques arrachés à l'édifice. Les volcans Kelut, en Indonésie (Zen et Hadikusumo, 1965 ; Pratomo, 1992 ; Bourdier *et al.*, 1997a,b ; Thouret *et al.*, 1998), ou Ruapehu en Nouvelle-Zélande (Cronin *et al.*, 1997 ; Joyce *et al.*, 2009 ; Carrivick *et al.*, 2010 ; Procter *et al.*, 2010, 2012 ; Keigler *et al.*, 2011) en sont des exemples. Enfin, les avalanches de débris, qui peuvent se produire lors de l'effondrement sectoriel d'un édifice volcanique, sont susceptibles sur leur partie distale de former des lahars (Ui *et al.*, 2000). Ce processus a notamment été montré au Mexique pour le volcan Colima (Capra *et al.*, 2002 ; Cortés *et al.*, 2009) ou le Citlaltépetl (Carrasco-Núñez et Rose, 1995), ou au St. Helens (Brantley et Waite, 1988). Il s'agit d'un cas un peu hybride, puisque les effondrements sectoriels ne sont pas forcément liés à une éruption, même si la plupart sont déclenchés par les déformations structurales de l'édifice induites par la remontée du magma.

1.1.2 Les lahars postéruptifs

Les lahars postéruptifs se produisent après les éruptions volcaniques. La remobilisation des matériaux éruptifs de type pyroclastique déposés sur les hauts versants d'un volcan après une éruption est déclenchée par des pluies intenses. Les lahars pluviaux sont ainsi fréquents après les éruptions explosives des volcans de cordillères ou d'arcs insulaires en milieu tropical, où les précipitations sont abondantes. Leur mode de déclenchement n'est donc pas volcanique ; les lahars postéruptifs pluviaux sont similaires aux coulées de débris ou laves torrentielles pouvant survenir dans des bassins-versants de montagne non volcanisée.

² Le terme islandais *jökulhaup* peut toutefois avoir une définition moins restrictive que « lahar », puisque Rodolfo (2000) y inclut également les écoulements torrentiels dilués, de même origine que les lahars classiques, mais de comportement rhéologique différent.

La littérature scientifique consacrée à ce type de lahars est représentée par les exemples du Pinatubo (Luzon, Philippines), où les lahars ont été particulièrement fréquents pendant toute la décennie qui a suivi l'éruption plinienne de 1991, notamment à cause des précipitations de typhon très abondantes (Tayag et Punongbayan, 1994). Les réseaux hydrographiques du Pinatubo sont devenus des laboratoires de recherche sur la dynamique des lahars (Marcial *et al.*, 1996 ; Tuñgol et Regalado, 1996), leurs processus de transport et leur rhéologie (Martinez *et al.*, 1996 ; Arboleda et Martinez, 1996), d'érosion et de déposition (Pierson *et al.*, 1996 ; Scott *et al.*, 1996), ainsi que leurs impacts géomorphologiques (Major *et al.*, 1996), sociaux et économiques (Janda *et al.*, 1996 ; Cola, 1996 ; Gaillard *et al.*, 2001). D'autres descriptions des lahars postéruptifs ont été menées sur les flancs du volcan Mayon aux Philippines (Rodolfo *et al.*, 1989 ; Paguican *et al.*, 2009), du Colima au Mexique (Davila *et al.*, 2007 ; Zobin *et al.*, 2009 ; Capra *et al.*, 2010), du volcan Unzen au Japon (Miyabuchi, 1999) ou du Vésuve en Italie (D'Ambrosio *et al.*, 2002 ; Oramas Dorta *et al.*, 2007). L'Indonésie, plus particulièrement, a également représenté un terrain d'étude privilégié des lahars, essentiellement ceux du volcan Semeru sur Java-Est (Lavigne *et al.*, 2003 ; Lavigne et Suwa, 2004 ; Thouret *et al.*, 2007 ; Gomez et Lavigne, 2010 ; Doyle *et al.*, 2010), du Papandayan (Lavigne *et al.*, 2005) et du Merapi (Lavigne *et al.*, 2000a,b ; Lavigne et Thouret, 2002).

Dans le cas des lahars postéruptifs, le matériel qui compose les lahars provient d'abord d'un stock de matériel remobilisable sur le talus proximal de l'édifice volcanique. Il s'agit la plupart du temps de téphras non consolidés, issus de retombées aériennes mais aussi de coulées et déferlantes pyroclastiques. Ce matériel est très poreux, possédant une perméabilité et une capacité d'infiltration très élevées (Tuñgol et Regalado, 1996). Les téphras les plus fins, de l'ordre des cendres (< 2 mm), sont aisément transportés par les eaux de pluie et créent des ravinements dans les dépôts situés sur les hauts versants du volcan. Pendant les précipitations, les téphras sont emportés dans les ravines qui, lorsqu'elles se rejoignent, peuvent former un flux plus conséquent ; entraîné par la pente, celui-ci forme progressivement un lahar. La mise en mouvement de ces matériaux est ainsi initiée par les eaux de pluies, en termes de durée et d'intensité. Les travaux menés aux Philippines au Pinatubo (Tuñgol et Regalado, 1996) montrent que des pluies très brèves (< 15 min) peuvent provoquer des lahars à condition d'être d'intensité élevée (0,15 mm/min). En revanche, au volcan Mayon, aux Philippines (Rodolfo *et al.*, 1989), ainsi qu'au Semeru en Indonésie (Lavigne et Suwa, 2004), le seuil de déclenchement est d'environ 0,6 à 0,7 mm/min. Au Merapi, Sudradjat et Tilling (1984), Takahashi (1994) et Lavigne *et al.* (2000a) l'ont estimé entre 0,3 et 0,4 mm/min. Ces valeurs sont liées à la nature du stock pyroclastique remobilisable : dans le cas du Pinatubo, la présence de téphras cendreux rejetés par l'éruption plinienne rend le matériel plus mobile que celui déposé par les éjectas vulcaniens ou par les coulées pyroclastiques d'effondrement de dôme, plus grossier. Si les lahars synéruptifs sont en général limités à la durée de l'éruption, les lahars postéruptifs peuvent se produire pendant plusieurs années. En domaine tropical, les pluies de saison humide peuvent remobiliser chaque année le stock pyroclastique : au Pinatubo, les lahars se sont produits pendant presque dix ans, déclenchés par les typhons annuels (Gaillard *et al.*, 2001). Au Merapi, les lahars ont traversé la rivière Boyong pendant 5 ans à chaque saison des pluies après l'éruption de 1994 (Lavigne et Thouret, 2002), puis pendant 3 ans dans la Gendol après l'éruption de 2006.

1.2 Natures des lahars et dynamiques de transport

La charge solide transportée par les lahars est constituée de matériel juvénile (téphras de toutes dimensions) mais aussi d'anciens dépôts et de fragments lithiques arrachés à la structure du volcan par *bulking*. Ce terme désigne la capacité d'un lahar à intégrer à sa propre masse des éléments provenant de la surface qu'il traverse ; Vallance parle de « matériel exotique » (2000). L'incorporation

progressive de charge solide augmente la concentration du lahar, dont les propriétés rhéologiques diffèrent alors de celles des écoulements fluviaux : les lahars ne correspondent donc pas à des dynamiques purement hydrologiques (Pierson, 1995). La typologie distingue classiquement deux natures de lahars, dépendant de leur concentration, et dont les modes d'écoulement ne sont pas les mêmes : les coulées de débris (*debris flows*) et les écoulements hyperconcentrés (*hyperconcentrated flows*).

1.2.1 Les coulées de débris

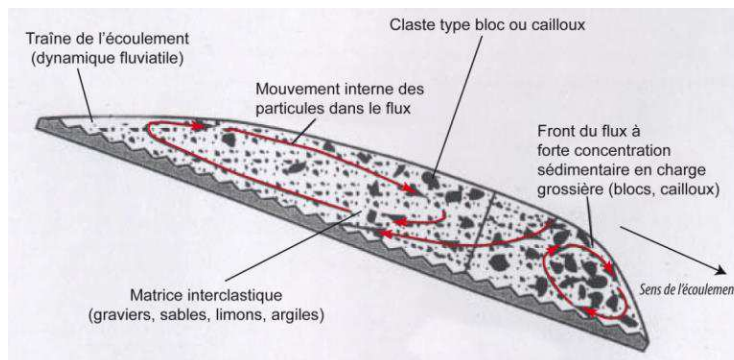


Figure 13 - Coupe en long d'une coulée de débris en mouvement (modifié de Vallance, 2000)

Les coulées de débris possèdent une charge solide représentant 50% à 60% de leur volume total. À la différence des écoulements fluviaux, dans lesquels l'eau transporte le matériel solide (Major et Newhall, 1989 ; Pierson, 1995 ; Iverson, 1997 ; Vallance, 2000), c'est la charge solide des coulées de débris qui

transporte avec elle de l'eau, laquelle lubrifie l'écoulement

(Rodolfo, 2000). Les coulées de débris ne s'écoulent pas de manière régulière ; les hydrogrammes étudiés par Pierson (1995) montrent un comportement rhéologique complexe, non-linéaire, lié aux contraintes que subit le flux. L'enrichissement par incorporation de matériel érodé (*bulking*) peut augmenter significativement la concentration d'un lahar, et réduire la proportion d'eau qu'il contient (Vallance, 2000 et 2005). En ce cas, sa forte concentration l'empêche de se conduire comme un liquide tel que l'eau, puisque l'interaction entre elles des particules de son abondante charge solide devient prépondérante et lui confère les propriétés des corps viscoplastiques (Pierson et Scott, 1985 ; Pierson, 1995 ; Scott *et al.*, 1995). Cela signifie que le fluide boueux est désormais contraint par des forces de cisaillement (*shear stress*) lors de la déformation que lui fait subir son écoulement, jusqu'à un certain seuil appelé *yield strength*, ou limite d'élasticité. Ainsi, le comportement des coulées de débris diffère des modes d'écoulements fluviaux (dits « fluides newtoniens »), qui ne possèdent pas de limite d'élasticité. Cela se traduit par un mode de transport du matériel marqué par l'entraînement de débris de très grandes dimensions, avec des particules en suspension non pas sableuses mais graveleuses (2 mm à 2 cm de diamètre). Les mouvements internes du flux favorisent les migrations circulaires du matériel transporté par percolation et expulsion (*squeeze expulsion*, Vallance, 2000), favorisant la migration des blocs et des cailloux à la surface du flux ainsi que sur sa partie frontale (Figure 13). La déposition du matériel ne se fait donc pas comme pour les fluides newtoniens, dans la mesure où les particules les plus denses et les plus grandes ne sont pas forcément déposées avant celles qui sont plus légères. Au contraire, la masse du flux peut donner l'illusion d'avoir été brusquement figée lorsque les forces de cisaillement (qui déforment et entraînent le flux sous l'action de la gravité) sont devenues inférieures à la limite d'élasticité (Fisher et Schmincke, 1984 ; Pierson, 1995 ; Vallance, 2000). Les coulées de débris sont donc avant tout marquées par des modes d'écoulement granulaires, dans lesquels l'eau n'est pas le vecteur principal du flux.

1.2.2 Les écoulements hyperconcentrés

Les lahars plus dilués pour lesquels la concentration de charge solide est comprise entre 20% et 60% du volume total appartiennent à la catégorie des écoulements hyperconcentrés (Pierson et Scott, 1985 ; Pierson, 1995 ; Vallance, 2000 ; Rodolfo, 2000 ; Lavigne et Suwa, 2004). Si leur plus grande proportion d'eau leur confère des dynamiques d'écoulements proches de celles des écoulements newtoniens, leur abondante charge sédimentaire leur donne une limite d'élasticité. Il s'agit donc là aussi de fluides visqueux, non-newtoniens, dont la dynamique est marquée par les interactions entre les particules transportées (Pierson et Costa, 1987 ; Pierson, 1995 et 2005). Toutefois, à la différence des coulées de débris, les particules transportées par les écoulements hyperconcentrés sont déposées de manière sélective et progressive, généralement en fonction de leur taille et de leur densité. Comme pour les dynamiques de transport fluvial, les écoulements hyperconcentrés transportent les matériaux légers et de petite taille en suspension, et la charge grossière par roulement sur le lit (Vallance, 2000). Les dépôts apparaissent moins massifs, et peuvent présenter une légère stratification litée, systématiquement absente de ceux laissés par les coulées de débris (Vallance, 2000).

1.2.3 Évolution spatio-temporelle d'un lahar

Vallance (2000) définit trois phases et trois stades dynamiques possibles pour un seul événement, traduisant cette variabilité du flux. Les « phases » et les « stades » correspondent aux changements de rhéologie subis par le flux au fur et à mesure qu'il s'écoule, associés à la diminution temporelle de son intensité, notamment de son débit. La Figure 14 reprend le modèle théorisé par Vallance (2000), pour un observateur situé en un point donné d'une rivière traversée par un lahar. On gardera à l'esprit qu'il ne s'agit que d'une approximation commode, le stade initial (*waxing stage*) n'est pas systématique, le front d'un lahar pouvant survenir sans augmentation significative du débit au préalable (Lavigne et Suwa, 2004). Un lahar, en outre, tend à se diluer et à prendre les caractéristiques de dynamiques torrentielles et fluviales à mesure qu'il s'étend vers l'aval et que sa concentration diminue par *debulking*, ou déposition du matériel transporté (Pierson et Scott, 1985 ; Scott, 1988 ; Scott *et al.*, 1995 ; Lavigne *et al.*, 2000a ; Lavigne et Thouret, 2002). Auquel cas, un observateur situé sur le talus distal d'un volcan (pente faible) ne verra pas forcément de coulée de débris se produire, mais assistera plutôt à un écoulement moins turbulent de type hyperconcentré.

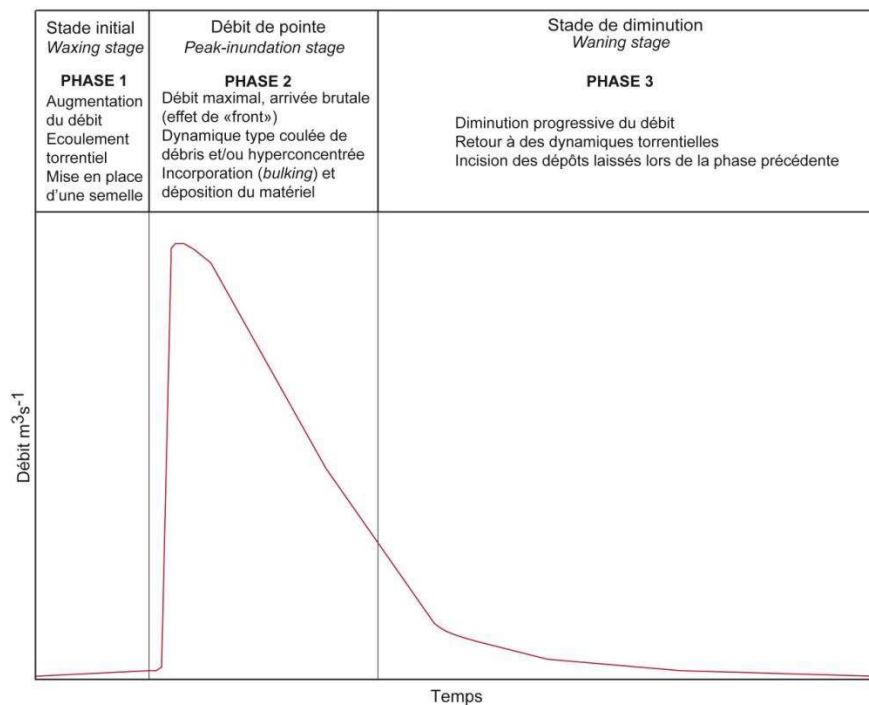


Figure 14 - Hydrogramme théorique d'un lahar « coulée de débris » et variations temporelles des stades et phases du flux.

L'origine des lahars joue sur leurs dynamiques de transport. Les lahars et jökulhaups déclenchés par la fonte brutale de neige ou de glace peuvent avoir des magnitudes et intensités particulièrement élevées, notamment à cause des grands volumes d'eau mobilisés. Des exemples issus du Cotopaxi (Équateur), du St. Helens et du Redoubt (Washington *et* Alaska, États-Unis), du Nevado del Ruiz (Colombie) montrent effectivement des débits de pointe excédant $100\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pour des distances parcourues supérieures à 60 voire 100 km (Pierson, 1995 ; Waythomas *et al.*, sous presse) ; pendant l'éruption du volcan Grímsvötn de 1937 (Islande), un lahar (aussi identifié comme jökulhaup) a remobilisé 7 km^3 de matériel volcanique (Rodolfo, 2000). Les lahars synéruptifs ont donc des magnitudes pouvant être supérieures aux coulées de débris déclenchées dans des bassins-versants non volcanisés : selon Vallance (2005), la magnitude des coulées de débris non volcaniques est typiquement comprise entre 10^2 et 10^7 m^3 , tandis que celle des lahars synéruptifs est comprise entre 10^4 et 10^9 m^3 .

Les lahars postéruptifs déclenchés par la pluie auront donc des intensités et des magnitudes moins élevées que les lahars synéruptifs, avoisinant les valeurs des coulées de débris non volcaniques. La variabilité temporelle des précipitations permet d'expliquer le déclenchement préférentiel de coulées de débris ou d'écoulements hyperconcentrés ainsi que leur évolution. Lavigne et Suwa (2004) ont notamment montré qu'au volcan Semeru, les précipitations orographiques ont tendance à déclencher plus de coulées de débris que les précipitations saisonnières de mousson. En outre, les variations d'intensité en amont favorisent la turbulence du flux en multipliant ses pulsations, rendant moins évidente la séparation du lahar en trois stades bien distincts.

2. Un aléa majeur

2.1 Les lahars, responsables des plus grandes catastrophes d'origine volcanique



Figure 15 - La ville d'Armero, ensevelie sous les dépôts de lahar du Nevado del Ruiz
(cliché USGS, 12 décembre 1985)

Les lahars représentent l'un des phénomènes volcaniques les plus dommageables (Neall, 1976) ; il s'agit d'un aléa fréquemment associés aux grandes catastrophes en lien avec une éruption. En 1586, l'éruption plinienne du volcan Kelut (Java-Est) a été accompagnée lahars synéruptifs de grande magnitude liés à la brutale vidange du lac de cratère, faisant environ 15 000

victimes (Pratomo, 1992). En 1919, la ville de Blitar située à une trentaine de kilomètres au sud du cratère de ce même volcan a été partiellement ensevelie sous un lahar qui tua 5 110 de ses habitants (Bourdier *et al.*, 1997a,b ; Thouret *et al.*, 1998). Un autre volcan javanais, le Galunggung, situé à l'ouest de Java dans la région de Bandung a entraîné la mort de 3 600 personnes en 1822 (Rodolfo, 2000). Quant à l'éruption de 1985 du Nevado del Ruiz en Colombie, elle provoqua un lahar qui ensevelit pendant la nuit du 13 novembre la ville d'Armero, distante de 74 km (Figure 15), en emportant près de 23 000 victimes (Voight, 1990 ; Thouret *et al.*, 1990 ; Pierson *et al.*, 1990). Le débit de pointe a été estimé à $48\,000\text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pour une vitesse de surface maximale de l'ordre de 60 km/h et une extension de 104 km depuis le cratère. Aux Philippines, les lahars qui ont suivi l'éruption du Pinatubo à partir de 1991 ont entraîné la mort de 600 personnes – soit deux fois plus que pendant l'éruption elle-même – et dévasté une surface de 2 km^2 , faisant disparaître des villages entiers, conduisant au relogement de 42 000 familles et remettant de fait entièrement en cause les structures sociales du flanc oriental du Pinatubo (Gaillard *et al.*, 2001). Au total, les lahars ont tué près de 31 500 personnes pendant le seul XX^e siècle.

Alors que les retombées aériennes et les flux pyroclastiques (PDC) restent la plupart du temps restreints à un secteur excédant rarement un périmètre de 10 km autour du volcan (à l'exception notable des blasts), les lahars peuvent s'étendre loin sur la *ring plain* qui entoure l'édifice volcanique, et atteindre des centres urbains. La dynamique du flux s'effectue de manière irrégulière, par pulsations pouvant provoquer des vagues d'autant plus dommageables qu'elles sont très chargées en matériel pouvant comprendre des blocs de grandes dimensions ($> 20\text{ cm}$ de diamètre). L'énergie des lahars les rend capables d'emporter les ponts, les barrages ainsi que les bâtiments qu'ils rencontrent (Major *et al.*, 1996). Les obstacles et débris provenant des infrastructures pulvérisées peuvent s'ajouter au flux, et en augmenter la turbulence et la concentration. Rodolfo estime jusqu'à 1 000 tonnes par m^2 la pression exercée par un lahar sur un bâtiment. En outre, notamment dans le cas de lahars synéruptifs, le matériel magmatique transporté est encore à température élevée, pouvant atteindre plusieurs

centaines de degrés et transformer le lahar en une coulée bouillante (Rodolfo, 2000). Même les écoulements hyperconcentrés en apparence moins intenses que les coulées de débris peuvent s'avérer très destructeurs, provoquant sapements de berge, débordements et ensevelissements, voire destruction de ponts. Leur dynamique visqueuse ne laisse aucune chance de survie aux personnes qui se font emporter : la vitesse et la concentration du flux ne permettent pas de s'y tenir debout, ni de surnager.

2.2 Étudier les risques liés aux lahars

2.2.1 Un aléa de mieux en mieux évalué et spatialisé

Les lahars représentant un aléa particulièrement destructeur, susceptible de s'étendre sur plusieurs dizaines de kilomètres en aval de sa zone de déclenchement, ils peuvent constituer un facteur de risque de catastrophe. L'étude de la dynamique des lahars a été initialement effectuée par la reconnaissance des dépôts (Scott, 1988 ; Vallance, 2000 ; Capra *et al.*, 2004), et par la prise directe d'échantillon dans le flux en mouvement (Lavigne *et al.*, 2000a ; Lavigne et Thouret, 2002 ; Lavigne et Suwa, 2004 ; Doyle *et al.*, 2010). Les techniques d'analyse indirecte des lahars ont été complétée par l'étude des vibrations sismiques du sol (RSAM et SSAM, Arattano, 1999 ; Lavigne *et al.*, 2000a,b ; Lavigne et Thouret, 2002 ; Doyle *et al.*, 2010) et par l'analyse des ondes acoustiques du bruit du flux (AFM Acoustic Flow Monitor, Marcial *et al.*, 1996 ; Tuñgol et Regalado, 1996 ; Lavigne *et al.*, 2000b ; Zobin *et al.*, 2009 ; Arattano *et al.*, 2012) ainsi que par la reconnaissance des signatures spectrales des dépôts par télédétection (Torres *et al.*, 2004 ; Hubbard *et al.*, 2007 ; Davila *et al.*, 2007 ; Huggel *et al.*, 2008 ; Joyce *et al.*, 2009). Également, l'usage de l'imagerie vidéo des flux en mouvements (Lavigne *et al.*, 2003 ; Gomez et Lavigne, 2010 ; Doyle *et al.*, 2010 ; Okano *et al.*, 2012) a permis de mieux comprendre les modes d'écoulement des lahars. Enfin, l'utilisation de modèles s'est largement répandue depuis les années 1990, et beaucoup d'auteurs géophysiciens ou géographes les ont utilisés pour produire des cartes d'aléas et modéliser les dynamiques du flux. Après l'usage des automates cellulaires (D'Ambrosio *et al.*, 2002, 2007), les programmes *LaharZ* (Iverson *et al.*, 1998 ; Schilling, 1998 ; Huggel *et al.*, 2008 ; Muñoz-Salinas *et al.*, 2009 ; Worni *et al.*, 2012 ; Darnell *et al.*, 2012 ; Cakir et Walsh, 2012) ou *Titan 2D* (Williams *et al.*, 2008 ; Procter *et al.*, 2010, 2012) sont fréquemment utilisés.

2.2.2 Perception de l'aléa et vulnérabilité face aux lahars

Si les premières études décrivant les lahars demeurent avant tout purement physiques, de plus en plus de travaux de sociologie et de géographie ont abordé le problème de la vulnérabilité et des risques liés aux lahars. La plupart de ces recherches ont été amorcées dans les années 1990, suite à la catastrophe d'Armero, et ce d'autant que les fréquents lahars du Pinatubo fournissaient alors un objet d'étude. L'article de Janda *et al.* (1996) pose les bases d'une définition des lahars comme aléa et comme risque. Ainsi, la variabilité régionale et les dynamiques de l'aléa sont définies, mais également les stratégies de réduction du danger telles que les moyens d'éducation et d'information des communautés concernées ainsi que les différentes combinaisons de systèmes d'alerte (Major *et al.*, 2003). Les travaux de Gaillard *et al.* (2001) sur le Pinatubo ont mis en avant les risques liés aux lahars, en insistant sur la vulnérabilité et en proposant une analyse du danger lié d'abord aux structures sociales des populations exposées. De même, D'Ercole et Metzger (2009) ont identifié les lahars comme des aléas potentiels sur les flancs du volcan Pichincha (Équateur), et se sont intéressés aux processus de vulnérabilité et aux enjeux du risque. Tout au long des années 2000 ont été publiés des travaux portant : sur la perception de l'aléa des communautés vivant dans les espaces exposés aux

lahars du Mont Rainier (Wood et Soulard, 2006), du Colima (Gavilanes-Ruiz *et al.*, 2009) ou du Ruapehu (Leonard *et al.*, 2008). Des articles discutant des fondements mêmes de la vulnérabilité face aux lahars ont été publiés pour le Nevado del Tolima en Colombie (Künzler *et al.*, 2012), le Pinatubo (Leone et Gaillard, 1999 ; Gaillard, 2008), le Karthala aux Comores (Morin et Lavigne, 2008) ou le Nevado del Toluca au Mexique (Aceves-Quesada *et al.*, 2007). Les lahars sont désormais entièrement intégrés aux études de risques sur les volcans actifs, et leur étude repose sur une méthodologie associant mesures géophysiques de l'aléa (rhéologie, sédimentologie, modélisation) et enquêtes de terrain (statistiques officielles, questionnaires systématiques).

2.3 Les lahars au Merapi

2.3.1 **Aperçu historique des événements et travaux majeurs**

Les lahars du Merapi représentent un aléa quasi-permanent dans la mesure où la fréquence des effondrements de dôme tout au long du XX^e siècle a régulièrement renouvelé le matériel pyroclastique remobilisable sur le talus proximal du volcan (Thouret *et al.*, 2000). Depuis l'ouverture de la structure de l'édifice vers l'ouest (cf. *supra*), les flancs occidentaux du volcan ont été systématiquement les plus exposés aux PDC et aux lahars qui les ont suivis, tandis que les flancs méridionaux l'étaient de manière plus anecdotique (Voight *et al.*, 2000). Les premières descriptions scientifiques sont dues à Kemmerling (1931), qui les nomme *waterladoe-overstrooming*, d'après le terme javanais *ladu* signifiant lahar. Schmidt (1934), propose un état des lieux complets des lahars survenus après l'éruption de 1930-1931, résumé par Voight *et al.* (2000) et Lavigne (1998). Tout au long du XX^e siècle (Tableau 4) jusqu'en 1994, ce sont les rivières du secteur occidental qui ont surtout été concernées (Blongkeng, Lamat, Putih, Batang, Senowo), celles du versant méridional l'ayant été plus occasionnellement (Gendol et Woro notamment). Les lahars se déclenchent en effet dans les bassins-versants ayant eux-mêmes été touchés par les coulées pyroclastiques d'effondrement de dôme. Après l'éruption de 1994 dont les PDC ont circulé dans la Bedog et la Boyong, les lahars qui ont suivi jusqu'au début des années 2000 se sont essentiellement produits le long de ces deux rivières, tandis qu'ils se raréfiaient sur l'ouest du volcan. Après l'éruption de 2006, qui cette fois-ci a touché la Gendol, les quelques lahars qui se produisent jusqu'en 2009 se sont quasiment exclusivement déclenchés sur ce bassin-versant. Il existe donc une répartition spatiale très nette des lahars au Merapi, étroitement liée à l'orientation des coulées pyroclastiques d'effondrement de dôme, généralement sectorisées et restreintes (Voight et Davis, 2000 ; Abdurachman *et al.*, 2000).

Les lahars du Merapi n'ont pas causé autant de victimes que les aléas éruptifs ; même si certains événements de grande ampleur (1822) ont été très meurtriers. En revanche, ils ont provoqué des dégâts particulièrement importants sur le bâti (plus d'un million d'habitations détruites), sur les infrastructures de transport, plus particulièrement les ponts, et sur la SAU avec plusieurs dizaines d'hectares ensevelis (Tableau 4). Il s'agit cependant d'impacts cumulés sur l'ensemble du XX^e siècle, puisque les occurrences de lahars prises à part sont rarement fortement destructrices (excepté dans les années 1930 et les années 1970 essentiellement). L'extension des lahars qui ont suivi les coulées pyroclastiques d'effondrement de dôme demeure d'ailleurs assez limitée : Lavigne et Thouret (2002) relèvent une distance parcourue maximale de 13 km depuis la zone proche du cratère. Cela peut être dû à une plus modeste réserve pyroclastique en amont après un effondrement par rapport aux volumineux dépôts des éruptions explosives ; il peut également s'agir de périodes de pluie moins intenses ; enfin, l'aménagement de la rivière n'est pas à négliger : la construction de nombreux barrages à sédiments, les sabo-dams, a très certainement contribué à limiter, depuis 1970, l'étalement des lahars vers le talus distal. Effectivement, les plus grandes extensions semblent être celles mesurées

par Schmidt en 1934, qui dépassent les 20 km dans la Batang, comme cela avait été suggéré par Junghuhn (1853) dans la même rivière.

Les enjeux sont élevés, avec notamment la présence de l'agglomération de Yogyakarta dont le centre-ville est situé à 25 km au sud du cratère. L'aire urbaine compte plus d'un million d'habitants, et est traversée en son milieu par la rivière Code, qui correspond en réalité à la partie aval de la Boyong, et dont les berges sont densément habitées. Suspectant qu'un lahar de grande extension pourrait y causer d'importants dommages, Lavigne (1999) a proposé une cartographie des risques reposant sur une étude à micro-échelle de la vulnérabilité des enjeux exposés.

Tableau 4 – Les lahars du Merapi : aperçu historique (données de Lavigne *et al.*, 2000a ; Voight *et al.*, 2000)

Date	Rivière	Dégâts
1822	Se, Pa, Ba, Bl, La, Wo,	100 morts ; 8 villages dévastés ; rivière Ba infranchissable 9 jours
1832	Bl	32 morts
1846	Wo	50 ha
1888	Tr, Se	1 village
1920	Se, Bl, Ba	1 village, 35 morts
1930	Se, Pa	1 pont, 70 ha de rizières
	Bl	1 pont
	La, Pu	Canaux d'irrigation endommagés
	Bo, Ku, Wo	Canalisations endommagées entre Kaliurang et Yogyakarta
	Ge	277 ha de plantation de café
2 janvier 1931	Ouest et Sud-Ouest	1 pont
11 janvier 1931	Ouest et Sud-Ouest	
14 janvier 1931	Ouest et Sud-Ouest	
27 avril 1931	Ba	1 pont
17 février 1932	Se, Pa, La, Bl, Ba	
7 avril 1932	Ba	1 village, 2 ponts
27–28 novembre 1961 ^a	Se, Bl, Ba	5 villages, 95 maisons, 1 pont
1962	Be	5 villages dévastés 2 personnes tuées et 5 blessées
1963	Bl	Chemin de fer Yogyakarta-Muntilan emporté Orphelinat détruit (pas de victimes)
7–8 janvier 1969 ^d	Se, Pa	2 villages, 38 maisons
	Bl, Pu	4 villages, 15 maisons, 3 ponts
	Be, Kr	6 villages, 239 maisons, 103 ha 2 ponts
	Bo, Co	2 villages, 1 pont
	Ku	2 villages, 1 pont
	Ge	9 villages, 390 maisons, >270 ha 2 ponts
	Wo	6 villages, 1 pont
19 janvier 1969	Be	12 maisons
20 janvier 1969	Pu	2 ponts et plusieurs dizaines de maisons
22 janvier 1969	Pu	15 maisons, 1 pont
23 janvier 1969	Bl	3 maisons
26 février 1969	Se, Pu, Be, Kr	Plusieurs dizaines de maisons
5 avril 1969	Pu	39 maisons
21 novembre 1969	Be, Kr	1 route et plusieurs (?) maisons
22 septembre 1973	Be	3 maisons
26 janvier 1974	Be	9 maisons
22 octobre 1974	Se	6 maisons
21 novembre 1974	Pu, Be, Kr, Bo, Ku	Plusieurs (?) maisons
22 novembre 1974	Pu, Be, Kr, Bo, Ku	43 maisons, 25 ha Bâtiments commerciaux
6 décembre 1974	Kr	14 maisons
5 mars 1975	Kr	102 maisons
22 mars 1975	Kr	12 maisons
4 octobre 1975	Pu, Be, Kr	5 villages, 20 maisons, 30 ha 1 pont
25 novembre 1976	Pu	3 villages, 17 maisons
	Be	306 maisons, 4 bâtiments publics, 330 ha
	Kr	3 ponts
11 décembre 1994	Be	2 camions emportés
2 février 1995	Be	3 camions emportés
20 mai 1995	Be	8 camions emportés
3 mars 1995	Bo	1 pont
5 décembre 1996	Bo	14 camions emportés

Se : Senowo ; Pa : Pabelan ; Ba : Batang ; Bl : Blongkeng ; La : Lamat ; Wo : Woro ; Tr : Trising ; Pu : Putih ; Bo : Boyong ; Ku : Kuning ; Ge : Gendol ; Be : Bebung ; Kr : Krasak ; Co : Code

2.3.2 Études en cours et positionnement de la thèse

Depuis les travaux de Lavigne *et al.* (1998, 1999, 2000a,b ; 2008 ; Lavigne et Thouret, 2002), aucune publication internationale n'a abordé le thème des lahars du Merapi dans les années 2000. Après l'éruption de 2006, la plupart des articles ont été consacrés aux écoulements pyroclastiques, qui apparaissaient comme l'aléa majeur du volcan (Charbonnier et Gertisser, 2008) ; les lahars qui ont suivi cette éruption ne semblent pas avoir causé de dommage en particulier, et sont en tout cas restés très modestes (N. Cholik, comm. orale). Suite à l'éruption de 2010, le contexte est un peu différent puisque contrairement à la quasi-totalité des événements du XX^e siècle, celle-ci a été explosive et a rejeté une plus grande quantité de matériel, non pas seulement vers un bassin-versant en particulier, mais sur l'ensemble du cône actif, à la fois sur les flancs nord, ouest et sud. La potentialité de déclenchement d'un lahar n'est ainsi plus restreinte à une ou deux rivières, mais à la quasi-totalité des 17 principaux axes hydrographiques s'écoulant sous le cône actif (cf. Introduction, Tableau 1). Il apparaît donc nécessaire de renouveler l'information disponible sur les lahars du Merapi, pour comprendre quels sont les risques qui persistent quand bien même l'éruption est finie, et quelles sont les rivières les plus dangereuses. Il convient donc d'apporter des données précises sur la répartition spatiale des lahars, leur fréquence, leurs extensions, leurs dépôts et leurs dégâts.

Le Tableau 4 mentionne, depuis les années 1990, 29 camions emportés par les lahars. Ces véhicules ne se trouvaient pas sur la route ou sur un pont mais dans le fond des vallées, à proximité des rivières. Ils sont effectivement directement exposés aux aléas parce qu'ils servent au transport des sables et des blocs retirés des dépôts de lahars. Il existe donc, au Merapi, une exposition de certaines personnes à un aléa parce que ce dernier est le vecteur d'une ressource minérale précieuse. Aucune publication n'a été réalisée sur ce sujet, et les cartes « de risque » ne prennent jamais en compte la présence des carrières ainsi exposées sur le trajet des lahars. C'est à travers ce prisme de l'aléa et de la ressource que cette thèse se propose d'étudier les lahars, afin d'apporter un éclairage supplémentaire à la géographie des risques au Merapi, notamment sur des espaces au fonctionnement original peu étudiés : les sites d'extraction. Il s'agira de l'appréciation du danger que représentent les lahars à l'échelle du volcan et de l'exploitation problématique de leurs dépôts dans le contexte postéruptif d'une éruption majeure.

III. Risques et ressources en milieu volcanique : deux éléments indissociables ?

1. Risque et ressource : la question de la vulnérabilité

1.1 La vulnérabilité comme origine des catastrophes ?

Une catastrophe d'origine naturelle exprime une rupture dans un espace (Brunet *et al.*, 2005) ; elle est la manifestation d'un risque auquel est soumis cet espace. La définition du risque nécessite l'explication de ses deux principaux facteurs : l'aléa et la vulnérabilité (Dauphiné, 2001), dont l'interaction spatiale et temporelle peut être cause d'endommagement (Pigeon, 2002). Un aléa désigne

la probabilité d'occurrence en un lieu donné et sur une période donnée d'un « phénomène naturel » pouvant menacer les personnes et les biens (Thouret, 2002, p. 507). Il y a risque lorsque ces derniers sont considérés comme « vulnérables ». Pour une mesure plus stratégique du risque sont également définis les enjeux, qui désignent la valeur (économique, affective...) des différents éléments vulnérables pouvant être endommagés par l'occurrence d'un aléa (Leone *et al.*, 2010). Il est donc possible de résumer le risque par l'équation :

$$R = A \times V \times E$$

où R désigne le risque, qui est alors une mesure du danger ayant la dimension d'une espérance mathématique, calculée par le produit de trois facteurs : l'aléa A , la vulnérabilité V , les enjeux E . Cet aspect multifactoriel du risque appelle une méthode d'analyse systémique explorant, pour un espace donné, les interactions dynamiques existant entre ces différents éléments physiques, économiques et sociaux (Pigeon, 2002).

Parmi eux, la vulnérabilité pose souvent problème tant l'étude de ses causes et de ses manifestations protéiformes apparaît vaste et complexe (D'Ercole, 1996 ; Pigeon, 2002). Aussi la notion de vulnérabilité a largement progressé, en même temps qu'en évoluaient les méthodes d'investigation (Leone et Vinet, 2006 ; Reghezza, 2006b). La vulnérabilité est peu à peu devenue une notion fondamentale dans les travaux de géographie (Leone et Vinet, 2006 ; Leone, 2008), de sociologie voire de psychologie étudiant les risques (Slovic, 2000 ; Kouabenan, 2006), et a permis de remettre en cause le concept de risque « naturel », qui sous-entendait que la nature était le principal responsable des catastrophes. Ce changement de paradigme a largement guidé les recherches des années 1990, qui se sont davantage intéressées aux processus spatiaux, sociaux et économiques à l'origine de la vulnérabilité et du risque (D'Ercole, 1996). Les études récentes fournissent une bibliographie très abondante qui a proposé des définitions plus ou moins complémentaires de la vulnérabilité, qui est un concept qui s'est affermi, mais également amplifié et complexifié (voir Leone, 2008, pour une typologie des différentes définitions existantes). La vulnérabilité désigne la faiblesse d'une population ou d'infrastructures exposées à un ou des aléas, en caractérisant « leur propension à souffrir des impacts d'un aléa » (D'Ercole *et al.*, 1994 ; D'Ercole, 1998). Leone et Vinet (2006) prolongent cette définition en précisant qu'en plus de l'endommagement (vulnérabilité dite « physique »), la vulnérabilité définit également la propension « au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés » (p. 11). D'après Cannon (1994), la vulnérabilité est même un facteur essentiel du risque : elle est ce qui transforme l'occurrence d'un aléa en catastrophe. Cette conception marque l'affirmation du paradigme radical dans l'épistémologie du risque en sciences sociales (Gaillard, 2008).

En 1976, P. O'Keefe *et al.* écrivaient qu'il fallait exclure les phénomènes naturels de la question des risques, avec un article au titre faussement paradoxal : « taking the naturalness out of natural disasters » (p. 566). Cette publication marque le retournement épistémologique qui s'esquisse dans l'étude des catastrophes pendant les années 1970-1980, mais qui en réalité est issu d'une réflexion plus ancienne, amorcée par l'École de Chicago (Reghezza, 2006b). À partir des années 1940, des géographes comme G.F. White montrent que la catastrophe n'est pas réductible à l'aléa, mais doit se comprendre dans la relation existant entre la société et le milieu physique : une mauvaise capacité d'adaptation est cause de désastre (Reghezza, 2006b). Dans les années 1980, l'approche technocratique aléa-centrée est évacuée par les travaux de Hewitt sur le « paradigme de l'extrême » (1983), qui considère la vulnérabilité non plus comme un état, mais comme un processus dans lequel la marginalisation sociale et économique d'une communauté joue un rôle prépondérant (Wisner, 1993). Ce sont les populations pauvres, marginalisées, qui d'une part sont reléguées dans des espaces où les aléas sont fréquents, mais qui, d'autre part, ne disposent pas des moyens physiques, techniques et financiers pour résister aux impacts parfois brutaux des aléas, et notamment des aléas d'origine

naturelle (Gaillard, 2007 et 2008 ; Gaillard *et al.*, 2008, 2009 et 2010). Quand survient l'aléa, c'est alors la catastrophe. La vulnérabilité « physique » du bâti (mais aussi des personnes, en termes médicaux, voir Baxter et Gresham, 1997) doit être complétée par la vulnérabilité « sociale » (Reghezza, 2006a). Les phénomènes de marginalisation sont en effet à l'origine d'une rétroaction qui entraîne vers la catastrophe des populations faibles : elles ne peuvent se protéger face aux dangers qui les menacent, et les désastres qui en découlent les affaiblissent davantage, grevant leur développement pour plusieurs années encore (Davis, 1978 et 1987 ; Gaillard et Cadag, 2009). Les populations marginalisées, pauvres, sont contraintes d'habiter des espaces plus dangereux mais n'ont pas les moyens de se protéger, ainsi que l'ont montré plusieurs études de catastrophes dans plusieurs contextes géographiques (Maltby, 1986 ; Kreimer et Munasinghe, 1991 ; Winchester, 1992 ; Wisner et Luce, 1993 ; Lavigne *et al.*, 2008 ; Gaillard, 2008 ; Leone, 2008 ; Texier *et al.*, 2009). Dans certains cas, la marginalité est renforcée par une marginalisation consécutive aux recompositions spatiales après une catastrophe, notamment pour les populations relogées (Davis, 1978 et 1987 ; Anderson et Woodrow, 1989 ; Oliver-Smith, 1991 ; Gaillard et Cadag, 2009). La catastrophe ne doit donc plus être considérée seulement comme la conséquence de l'occurrence d'un aléa sur un espace donné, mais, au contraire, comme le révélateur de la vulnérabilité quotidienne des populations et des infrastructures vivant et aménagées sur cet espace. Une telle conception oblige alors le chercheur à ne plus penser de manière synchrone l'aléa, la vulnérabilité et les enjeux : l'occurrence du phénomène naturel est une récurrence statistique (aboutissant à une probabilité) traduisant un événement discret, ponctuel. En revanche, enjeux et vulnérabilité doivent se penser en continu. La vulnérabilité est imputable à des défauts d'adaptation et de récupération nécessitant une approche multiple (Reghezza, 2006a) qui s'intéresserait à la capacité d'une population à faire face à des aléas (O'Keefe *et al.*, 1976 ; Davis *et al.*, 2004) et à leur résilience, c'est-à-dire leur faculté de retrouver rapidement leur mode de fonctionnement après une catastrophe (Wisner *et al.*, 2004). Vient ainsi une temporalité du risque qui dépasse celle de la catastrophe, et qui s'exprime à travers des concepts comme la capacité ou la résilience qui offrent une compréhension plus nette de la vulnérabilité d'une communauté (Dauphiné, 2001, 2004 ; Dauphiné et Provitolo, 2007).

Les travaux les plus récents s'attachent donc à montrer que la première cause des catastrophes n'est pas à rechercher dans l'occurrence plus ou moins probable d'événements extrêmes. Le concept de *livelihood* que l'on peut tenter de traduire par « moyens d'existence » ou « moyen de subsistance » a été théorisé et utilisé pour évaluer la vulnérabilité d'une population, dans différents contextes, notamment volcanique (Scoones, 1998 et 2009 ; Sanderson, 2000 ; Twigg, 2001 et 2004 ; Kelman et Mather, 2008 ; Gaillard *et al.*, 2009 et 2010). Selon Wisner *et al.* (2004), le risque aurait ainsi pour cause profonde un accès limité aux ressources, rendant difficile la subsistance d'une communauté, et ce d'autant plus si elle est soumise à des pressions politiques, sociales, démographiques et environnementales. La vulnérabilité est ainsi conçue comme le résultat d'une progression qui aurait son origine dans l'accès aux moyens de subsistance. L'ensemble des biens matériels et immatériels que Twigg appelle « les capitaux » (2001), d'une communauté donnée, permet d'en déduire sa capacité à non seulement faire face à un aléa, mais aussi à retrouver son fonctionnement normal après la rupture induite par l'occurrence de cet aléa. Les possessions et les ressources dont disposent au quotidien une population caractérisent donc leur capacité (Davis *et al.*, 2004), et également leur résilience. La vulnérabilité, à ce titre, devient un concept dynamique, révélant des processus ancrés dans la vie quotidienne de la population étudiée. Leone et Vinet (2006) montrent que si le concept de vulnérabilité s'est clarifié et enrichi de notions voisines et complémentaires telles que la capacité – au risque d'en complexifier la définition – la quantification et la modélisation restaient encore peu abouties, rendant ardue toute approche globale et systémique, pourtant nécessaire (D'Ercole *et al.*, 1994 ; Pigeon, 2002).

1.2 Mesurer la vulnérabilité

La mesure de la vulnérabilité sociale exige de ne pas la réduire à une somme d'enjeux plus ou moins vulnérables. La gageure méthodologique pour l'évaluation de la vulnérabilité se heurte ainsi à un positionnement qui exige d'être discuté par les auteurs : comment qualifier, comment quantifier la vulnérabilité ? Il n'existe pas d'échelle universelle de valeur de vulnérabilité, tant les situations et les échelles d'analyse sont variées. C'est donc au chercheur de justifier ses choix à l'aide de données récupérées sur le terrain. Cet aspect souvent empirique de l'évaluation de la vulnérabilité démultiplie les méthodes de recherche et les résultats obtenus, dans l'optique de comprendre quelles sont les failles du système économique et social pouvant dégénérer en catastrophe lorsque survient un aléa.

La qualification de la vulnérabilité vise à établir un bilan des éléments faibles et affaiblissants d'un espace à partir d'une grille de lecture thématique : croissance démographique et urbaine, facteurs socio-économiques, perception des aléas et mémoire des catastrophes, caractéristiques culturelles, moyens techniques et humains de la gestion de crise, fonctionnement ou dysfonctionnement politique et administratif, mobilité et accessibilité (D'Ercole *et al.*, 1994 ; Leone et Vinet, 2006 ; Donovan, 2010).

La démarche quantitative mesure le taux d'endommagement potentiel, par exemple le bâti, que ce soit une estimation des pertes possibles des éléments exposés (Lavigne, 1999), ou une étude des endommagements avérés ou probables (Leone et Vinet, 2006 ; Leone, 2008). Pour la vulnérabilité sociale, un nombre important d'études la détermine à l'aide de questionnaires systématiques adressés à une population, permettant ensuite de la quantifier par les statistiques (Hodge *et al.*, 1979 ; D'Ercole et Rançon, 1994 ; D'Ercole, 1996 ; Drabek, 1999 ; Gaillard *et al.*, 2001 ; Gregg *et al.*, 2004 ; Dominey-Howes et Minos-Minopoulos, 2004 ; Lavigne *et al.*, 2008 ; Carlino *et al.*, 2008 ; Texier *et al.*, 2009 ; Barberi *et al.*, 2008 ; Gaillard *et al.*, 2009 ; Gaillard et Cadag, 2009 ; Rolandi, 2010 ; Mei et Lavigne, 2011). Dans le cas du risque volcanique, les principaux critères de vulnérabilité sociale (ou humaine) relevés par Leone et Vinet (2006) consistent d'abord en la perception et la représentation des menaces, même si quelques études, notamment menées par D'Ercole (1996, mais aussi D'Ercole et Rançon, 1994 ; D'Ercole et Metzger, 1999) envisagent également des critères institutionnels, sociaux, économiques, ainsi que le bâti et les comportements, déjà étudiés par Quarantelli (1984). L'analyse factorielle de données statistiques multivariées issues de questionnaires permet d'isoler plusieurs catégories de vulnérabilité, pouvant ensuite être caractérisées pour chaque unité spatiale de référence de l'enquête (D'Ercole, 1996).

Les méthodes qualitatives et quantitatives sont résumées par Dauphiné (2004) en deux approches qu'il nomme « analytique » et « synthétique ». La première a pour objectif l'examen diagnostique des enjeux exposés pour en évaluer l'endommagement probable, tandis que la seconde privilégie la combinaison de méthodes quantitatives et qualitatives pour obtenir un aperçu plus dynamique et systémique de la vulnérabilité.

2. Le cas des espaces volcaniques

2.1 Aperçu des ressources en milieu volcanique : agriculture, géothermie et tourisme

Les différentes possibilités d'exploitation des volcans en font des espaces attractifs, près desquels se fixent des communautés humaines pouvant être menacées par les aléas (Harris, 2000). Ainsi, le développement préhistorique des civilisations précolombiennes est jalonné de hiatus correspondant à des périodes de déclin induites par des catastrophes (Hall et Mothes, 2008), mais qui ne suffisent pas à provoquer l'abandon massif des volcans compte tenu des ressources qu'ils possèdent. En 1981, Duncan *et al.* notaient que le mont Etna représentait moins de 10% de la surface de la Sicile, mais regroupait 20% de la population, compte tenu de sols excellents pour l'agriculture, et de la présence de sources permanentes. De la même manière mais dans un autre contexte, les volcans des Caraïbes représentent des espaces dynamiques et attractifs : à St-Vincent-et-les-Grenadines, l'agriculture et l'exploitation des dépôts volcanoclastiques de la Soufrière représentent des bénéfices considérables pour le pays (Robertson, 1995).

Les volcans regroupent des ressources variées, à commencer par la nature de leurs sols. L'altération des matériaux d'origine volcanique n'est pas immédiate, et avant de produire un sol de bonne qualité, les téphras tendent plutôt à stériliser pendant quelques saisons voire pendant quelques années les surfaces qu'elles recouvrent. Dans le cas des laves, certaines coulées visqueuses et acides (aa) associées à des climats froids ne permettent pas d'exploitation agricole, et sont alors le support de forêts (cheires du Cantal) ou de landes broussailleuses (Laugahraun, Islande). Cependant, les andosols formés sur des matériaux volcanoclastiques décrits par Ping (2000), représentent 1% de la surface terrestre mais 10% de l'agriculture mondiale en dépend. Ils sont reconnus comme particulièrement fertiles, notamment dans les régions tropicales humides. Ping (2000) insiste sur la faible densité apparente des andosols, qui en fait des sols particulièrement perméables et poreux, adaptés à la croissance des végétaux.

Également, les ressources géothermales, qui permettent l'utilisation de l'énergie et de la chaleur internes de la Terre, représentent une ressource appréciable. Le Japon, l'Islande, la Chine et les États-Unis consommaient à la fin des années 1990 plusieurs milliers de GWh (Gigawatt-heures) par an, fournis par l'exploitation géothermale (Fridleifsson et Stefánsson, 1998 ; Arnórsson, 2000). L'enjeu est évidemment stratégique pour soutenir une demande énergétique sans cesse croissante, notamment dans un contexte de développement économique tel que celui de l'Indonésie (Alzwar, 1986). On n'oubliera pas non plus que le tourisme est un facteur essentiel du développement des volcans. Après l'éruption de 2010 du Merapi, de nombreuses agences de voyage de Yogyakarta proposaient des visites dans les villages détruits, où la présence de petits commerces et de restaurants permettaient aux habitants sinistrés de récupérer quelque argent. En Islande, suite à l'éruption de l'Eyjafjöll (avril 2010), des boutiques mettaient en vente des bouteilles de cendres rejetées par l'éruption. Les paysages volcaniques attirent, et nécessitent donc la création de structures d'encadrement et de protection adaptées. Sigurdsson et Lopes-Gautier (2000) rappellent d'ailleurs que les espaces volcaniques ont dès le XIX^e siècle été protégés par des parcs naturels, notamment aux États-Unis : Yellowstone fut le premier établi dès 1872, suivi au XX^e siècle par quatre parcs dans la chaîne des Cascades, dont le site de Crater Lake. Ce type de mise en valeur touristique et environnemental se retrouve d'ailleurs sur plusieurs volcans équatoriens (Galapagos, Cotopaxi), chiliens, colombiens et argentins (Sigurdsson et Lopes-Gautier, 2000). Quant au Merapi, les forêts de pins d'altitude sont protégées depuis 2004 par un parc naturel national. L'attirance des touristes pour les volcans est éventuellement guidée par l'aspect spectaculaire de certaines manifestations éruptives

(Sigurdsson et Lopes-Gautier, 2000 ; Heggie, 2009 ; Laws, 2011), et peut apporter des revenus importants : pendant la première phase éruptive de l'Eyjafjöll, le spectacle des coulées de lave a causé une hausse de 20% des réservations touristiques (Heggie, 2010). Cependant, l'accueil de touristes peut s'avérer dangereux (Heggie, 2010), d'autant qu'une enquête menée en Islande à proximité du volcan Katla en Islande a montré qu'une grande majorité des visiteurs ignoraient les dangers susceptibles de se produire (Bird *et al.*, 2009).

2.2 Intégrer les ressources à la gestion des risques

Les ressources en milieu volcanique permettent à des communautés de se fixer durablement – on estime que la riziculture irriguée austronésienne sur les flancs actifs indonésiens et philippins est pratiquée depuis plusieurs millénaires (Ping, 2000 ; De Koninck, 2005 ; Bruneau, 2006), que la menace des aléas ne remet pas en cause. Dans le contexte actuel d'une approche des risques à partir des moyens de subsistance d'une communauté donnée (Wisner *et al.*, 2004 ; Gaillard, 2007), considérer la ressource comme une clé d'étude de la vulnérabilité et donc du risque apparaît être une démarche probante, à plus forte raison sur un volcan. Kelman et Mather (2008) résument effectivement la situation inhérente aux espaces volcaniques en écrivant que les populations « vivent avec le risque grâce à des moyens de subsistance durables » (p. 190), lesquels rendent alors ce risque acceptable. Cette acceptabilité du risque implique de pouvoir vivre avec les aléas, lesquels deviennent partie intégrante du quotidien des populations exposées. Dans le cas d'aléas fréquents – notamment les lahars postéruptifs – Kelman et Mather (2008) suggèrent d'ailleurs de modifier en ce cas le terme « aléa » en « événement » ou « phénomène » afin d'en limiter la connotation probabiliste voire exceptionnelle. C'est dans cet esprit que ces auteurs mettent en avant le concept de « sustainable livelihoods approach » en milieu volcanique, reprenant d'ailleurs la notion de « sustainable livelihood » expliquée par Twigg (2001), pour gérer efficacement les risques en comprenant mieux quels sont les modes de vie des communautés menacées et ainsi apporter des systèmes d'alerte et d'évacuation adaptés. À ce titre, l'approche participative a été largement utilisée (Heijmans, 2004 ; Cronin, 2004a,b ; Gaillard *et al.*, 2008, 2009 ; Mei et Lavigne, 2012), permettant notamment de redonner la parole aux populations avant l'éruption (*preparedness* – De La Cruz-Reyna *et al.*, 2000) et après (reconstruction, réparation, résilience). Bien qu'essentielle pour gérer efficacement les risques, le développement de l'exploitation de certaines ressources d'une communauté n'est pas non plus une solution miracle pour assurer leur développement, et se heurte à plusieurs limites notamment d'ordre environnemental (dégradation) et sécuritaire (exploitation de certaines ressources mettant en danger les travailleurs).

3. Laves et matériel volcanoclastique comme ressources

3.1 De nombreuses applications industrielles

L'extraction des dépôts volcanoclastiques apporte des matières premières largement utilisées dans les domaines du bâtiment et de l'industrie chimique (pharmaceutique et cosmétique) compte tenu de leur vésicularité (excellents isolants), de leur robustesse (laves et ignimbrites indurées³), peu solubles dans l'eau (donc moins altérables que certaines roches sédimentaires comme le grès ou le calcaire), ayant une bonne résistance à la chaleur (matériaux réfractaires). Le Tableau 5 donne un aperçu des différentes matières premières minérales d'origine volcanique, leurs caractéristiques physiques ainsi que leur utilisation industrielle.

Les premiers objets manufacturés issus de matières premières volcaniques sont certainement les pointes de lance taillés dans des verres volcaniques. Leur excellente qualité a d'ailleurs parfois été le fondement économique de puissantes civilisations, comme l'empire de Teotihuacan au Mexique (VI^e-VII^e siècles) passé maître dans la confection de lames d'obsidienne (Dehn et McNutt, 2000). Aujourd'hui, l'industrie tire parti des propriétés physiques et chimiques des téphras en les utilisant comme additifs, absorbants, isolants ou comme béton. Les ponces notamment produisent d'excellents abrasifs (la vésicularité élevée du matériel favorise son débitage en éléments fins, irréguliers et à arêtes aiguës) qui peuvent être notamment utilisés dans l'industrie cosmétique (Figure 16) pour la fabrication de savon (Dehn et McNutt, 2000). La perlite (verre volcanique fortement hydraté) trouve des applications telles que la construction, la céramique, l'agriculture ; les cendres sont également très employées (construction, routes, agriculture) car elles forment un matériel très résistant dont les particules ne peuvent être brisées, et résistant à l'altération. L'ensemble de ces matériaux volcaniques représente un marché mondial en pleine expansion : l'USGS estime que la production mondiale excède les 15 millions de m³, très largement dominée par l'Italie (4 millions de m³ par an), la Turquie (3 millions de m³ par an), ainsi que les États-Unis, le Chili, la Grèce, et l'Iran (> 1 million de m³ par an).



Figure 16 – Savon auquel des cendres ponceuses du St Helens ont été incorporées (<http://greg-willis.com/2010.05.18/mount-st-helens-soap>)

³ Les ignimbrites désignent des dépôts pyroclastiques riches en ponces, pouvant être indurés et possédant une matrice vitreuse. Elles sont mises en place lors d'éruptions explosives de grande intensité (Sigurdsson, 2000).

Tableau 5 – Utilisation industrielle des roches, verres et minéraux volcaniques (A : Matières premières ; B : Matériaux transformés ; modifié de Dehn et McNutt, 2000)

A

Matières premières	Couleur	Granulométrie	Densité (g/cm ³)	Résistance (compression) (kbar)	Conductivité thermique (kcal/m.h.°C)	Utilisation industrielle
Téphras scoriacés	Grise Noire ou rouge (pouzzolanes)	Sables Agrégats grossiers < 3 cm	1,2 – 2,5	0,6 – 1,6	< 1,0	Fabrication de béton, construction de routes, ballast, isolant
Lave basaltique	Noire à grise	Blocs massifs	2,4 – 3,1	2,0 – 3,0	2,0 – 3,0	Bâtiments, ornements, isolant
Cendre rhyolitique	Grise à brune	Agrégats fins < 2 mm	1,5 – 2	< 0,1	< 1,0	Abrasif, fabrication de perlite, bon réfractaire, isolant.
Téphras ponceux	Grise à brune	Agrégats 0,2 à 10 cm	0,5 – 1,5	< 0,5	< 0,75	Absorbant, abrasif, bon isolant
Ignimbrite	Brune	Blocs massifs	2,1 – 2,8	< 1	2,0 – 3,0	Ornements, construction, isolant de qualité moyenne à médiocre
Lave rhyolitique	Brune à gris foncé	Blocs massifs	2,1 – 2,8	< 25	2,0 – 3,0	Ornements, construction, isolant de qualité moyenne à médiocre
Obsidienne	Noire	Lentilles centimétriques (cf. larmes de Pélé)	2,0 – 2,5	< 11	2,7 – 3,5	Ornements, instruments tranchants, isolant médiocre
Soufre	Jaune	Microcristalline	1,95 – 2,1	< 0,1	0,13	Additif chimique, agent indispensable à la vulcanisation des élastomères (caoutchouc)
Bentonite (argiles d'altération des cendres)	Brun clair	< 2 µm	1,8 – 2,6	< 0,1	Très variable	Additif de boues de forage, mastic, excellent isolant

B

Matériaux de transformation	Couleur	Granulométrie	Densité (g/cm ³)	Résistance (compression) (kbar)	Conductivité thermique (kcal/m.h.°C)	Utilisation industrielle
Béton	Grise	Blocs (fabriqués)	2,0	< 0,5	3,0 – 4,5	Construction, isolation
Perlite	Blanche à gris clair	Agrégats grossiers < 3 cm	0,3 – 1,2	< 0,1	< 1,0	Absorbant, isolant, béton léger

3.2 Un matériel de construction privilégié

3.2.1 Grottes, pierres de taille et béton

Les matériaux volcaniques ont souvent pu jouer un rôle direct dans la construction d'abris pour les populations humaines, comme en témoignent les grottes et les campements retrouvés sous certaines mesas du Cantal, du Velay ou du Devès (Bardintzeff, 2006). Par ailleurs des constructions troglodytiques ont été creusées dans les ignimbrites, qui forment un habitat solide et isolant, telles les grottes de Cappadoce. À l'époque médiévale, le « manteau d'églises » qui recouvre l'Europe n'est pas forcément blanc : de nombreuses églises et abbayes sont bâties en pierre volcanique noire ou grise, ainsi les cathédrales de St-Nectaire et de Clermont-Ferrand en France, ou celle de Cologne (Allemagne) dont plus de 150 000 tonnes de matériaux proviennent du volcan Eifel (Dehn et McNutt, 2000). Les scories basaltiques (téphras vésiculés) que peuvent éjecter certains volcans sont également utilisées dans la construction sous le nom de pouzzolanes. De grandes carrières sont exploitées en France au Puy de Lemptégy (chaîne des Puys), lequel a émis des pouzzolanes lors de son activité strombolienne qui entrent dans la composition de beaucoup d'isolants thermiques ou de blocs de béton. De grandes carrières existent également aux îles Lipari (Bardintzeff, 2006). Ce matériel est d'ailleurs connu depuis l'époque romaine, et a été longtemps privilégié car il formait un mortier non soluble dans l'eau, au contraire du mastic égyptien élaboré à partir de gypse ; il était également pulvérisé sur les bâtiments pour en améliorer la résistance, garantissant l'exceptionnelle solidité de nombre d'édifices (Dehn et McNutt, 2000).

Le béton peut être fabriqué à partir de n'importe quel agrégat mais la résistance et l'isolation prodiguées par les matériaux volcaniques constitue un atout privilégié. Il est ainsi d'une qualité de 3 à 4 fois supérieure à celle du béton normal peu isolant, dont la conductivité thermique n'excède guère 0,35 à 1,5 kcal/m.h.°C. La vésicularité du matériel employé permet de limiter les transferts de chaleur, qui circule très mal à travers la roche. Cette particularité isolante des matériaux volcaniques est supérieure à celle des autres roches magmatiques comme le granite, qui possède une résistance similaire mais limite mal les transferts de chaleur. La propriété réfractaire du béton d'origine volcanique empêche également les bâtiments de s'effondrer en cas d'incendie ou permet l'installation de coupe-feu efficaces. Des entreprises de BTP comme Biotherm sont devenues spécialistes de constructions en tout genre (du hangar au pavillon) en briques de béton élaboré à partir de ponces, et témoigne d'un marché de plus en plus répandu. Le prix demeure toutefois plus de deux fois plus cher que le béton classique, autour de 11 € la brique (Jaloux, 2012).

3.2.2 Que sont les dépôts volcanoclastiques et quelles ressources représentent-ils ?

Les dépôts volcanoclastiques mis en place par les lahars remplissent les vallées et sont incisés par l'érosion des petits réseaux hydrographiques qui les drainent. Ils forment des masses sableuses (0,05 mm à 2 mm) et graveleuses (2 à 20 mm) parcourues de clastes ayant des dimensions allant des cailloux (20 mm – 200 mm) aux blocs (> 200 mm), de couleur noire ou grise. Ils s'apparentent donc aux téphras scoriacés et aux blocs de lave identifiés au Tableau 5.

Les coulées de débris laissent des dépôts massifs à tri faible voire inexistant, et montrent généralement une distribution granulométrique bimodale (pics de fréquence statistique des particules fines et des particules grossières). Les couches peuvent présenter un granoclassement normal ou inverse (Figure 17), mais cette structure n'est pas systématique (Vallance, 2000). L'épaisseur varie de quelques dizaines de centimètres jusqu'à plusieurs dizaines de mètres dans le cas d'événements de très grandes intensité et magnitude (Mont Rainier : Schilling, 1998). Les dépôts localisés dans les fonds de vallée ou dans les chenaux des rivières sont généralement plus épais que ceux issus des débordements

sur les interfluvies. Les écoulements hyperconcentrés, en revanche, forment des dépôts de structure et de texture intermédiaires entre celles des coulées de débris et celles des dynamiques fluviales. Même si le tri du matériel demeure faible, il est meilleur que celui des coulées de débris, et le matériel est généralement plus fin avec peu de blocs. Il est possible d'y distinguer un léger litage (Vallance, 2000). Leur épaisseur est moindre que celle des dépôts laissés par les coulées de débris (Figure 17).



Figure 17 - Exemples de dépôts volcanoclastiques (terrasse de la rivière Lengkong, talus distal du volcan Semeru, Java ; cliché M. Deglaire, août 2008). Noter la grande hétérométrie du matériel déposé, l'épaisseur métrique des couches de coulées de débris. L'altération des dépôts plus anciens (sol visible sur la berge en arrière-plan) est particulièrement rapide en milieu tropical humide.

Les dépôts volcanoclastiques sont donc composés de matériel grossier et de sables, lesquels représentent 10% à 40% du poids d'un échantillon pour les dépôts de coulées de débris, et 50% à 60% pour les dépôts d'écoulements hyperconcentrés (Lavigne et Thouret, 2002 ; Capra *et al.*, 2004). La proportion de limons (0,002 mm à 0,05 mm) et d'argiles (< 0,002 mm) excède rarement les 10% dans le cas des lahars postéruptifs déclenchés par des précipitations, puisque le matériel remobilisé concerne essentiellement des dépôts pyroclastiques assez grossiers. En revanche, les lahars issus d'avalanches de débris sont plus riches en fractions très fines puisqu'une grande partie du matériel effondré est typiquement altéré par hydrothermalisme (Vallance, 2000), ce qui en fait des matières premières moins intéressantes à exploiter.

Les matériaux utilisés pour produire du béton sont les fractions sableuses et graveleuses ; les sables grossiers sont préférés aux sables fins pour la production d'un béton de qualité, ce dernier étant jugé trop peu cohérent pour obtenir un mélange suffisamment solide. Il est en revanche plus apprécié pour la fabrication de poterie ou de verres (Dehn et McNutt, 2000). Quant aux blocs, ils sont également exploités, afin de fournir du matériel de fondation, des pierres de taille pour le bâtiment ou l'artisanat (Figure 18). Il est fréquent de trouver des tommettes, des piliers, des lanternes fabriqués en roche volcanique (basalte, andésite, rhyolite polie) et l'industrie de l'ornementation est développée dans de nombreuses régions volcaniques touristiques telles le Chili, l'Islande, l'Indonésie ou le Japon.

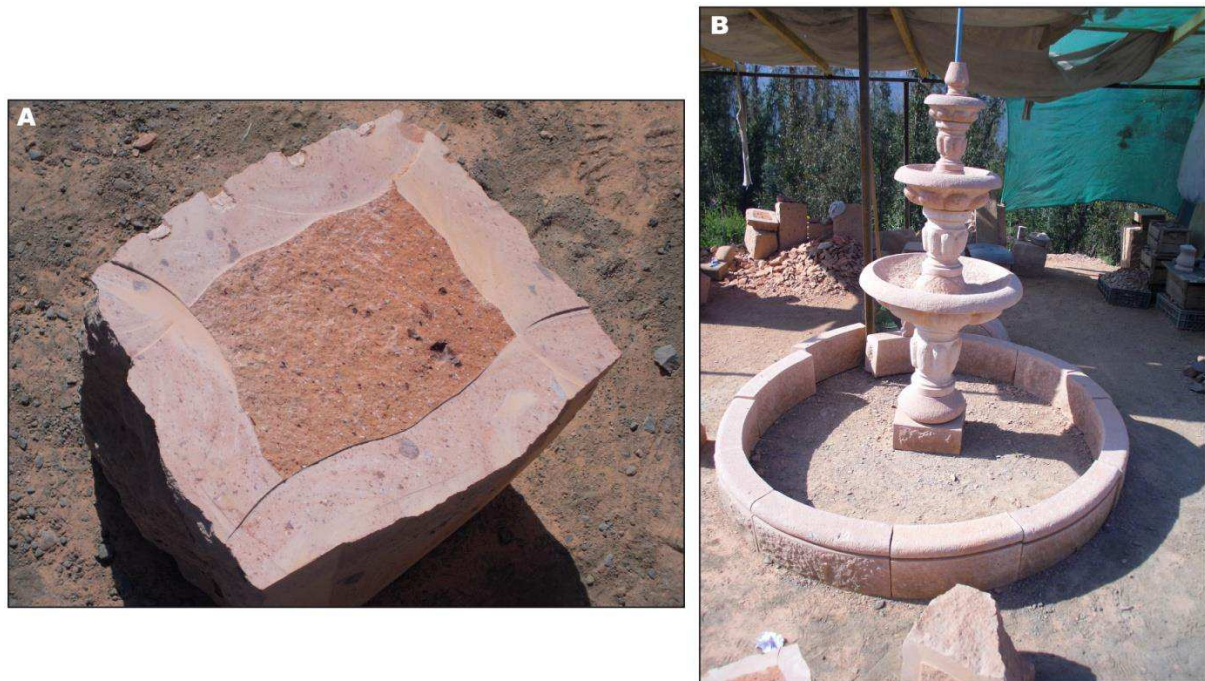


Figure 18 - Articles d'ornementation en matériel volcanique dans un atelier d'artisanat de la vallée du Maipo, Chili central. A : la matière première, un bloc de rhyolite (lave acide) ; B : sculpture en rhyolite.

Clichés E. de Bélizal, novembre 2011.

3.3 Les enjeux au Merapi : problématique de la thèse

L'exploitation des dépôts volcanoclastiques est une pratique très répandue en Indonésie, et des carrières sont installées sur les flancs des grands massifs volcaniques : Batur (Bali : Prayoga, 2008), Semeru ou Kelut (Java : De Bélizal, 2009), Anak Krakatau (détroit de la Sonde), Rinjani (Lombok), ainsi qu'au Merapi. Les blocs de lave andésitique transportés par les coulées pyroclastiques puis par les lahars depuis le talus proximal du volcan vers le talus distal ont servi de matières premières à l'édification des temples hindouistes et bouddhistes des royaumes javanais indianisés (Figure 7A et B). La récupération du matériel volcanique s'inscrit donc dans une certaine tradition architecturale. Aujourd'hui, les blocs sont utilisés pour la fondation des constructions, mais peuvent entrer dans la maçonnerie de l'édifice. C'est cependant le béton qui demeure le moyen de construction habituel des architectes indonésiens (Prawoto, comm. orale) et notamment le béton volcanique : 90 à 95% des agrégats utilisés pour les fondations des routes ; 70% des agrégats utilisés pour la fabrication du béton (De Bélizal, 2009). Le sable et les graviers fins (< 5 cm) sont les matériaux volcanoclastiques les plus utilisés ; l'exploitation des blocs existe, mais de manière moins importante (De Bélizal, 2009).

La fréquence d'occurrence des coulées pyroclastiques d'effondrement de dôme et des lahars consécutifs dans les vallées du Merapi permet le renouvellement régulier de la ressource en sables et

en blocs. Celle-ci donne lieu à une exploitation abondante, regroupant un grand nombre de personnes dans des sites d'extraction contenant chacun un nombre variable de carrières (De Bélizal, 2009 et 2011). Ces personnes travaillent cependant dans des espaces exposés aux aléas, dans la mesure où la ressource est apportée par les lahars, dont l'occurrence peut menacer les travailleurs. Il existe ainsi une double dimension des lahars : d'un côté, un aléa potentiellement dangereux ; de l'autre, il s'agit du vecteur d'une ressource très prisée. Cependant, aucune recherche internationale n'a encore apporté de données précises relatives à cette activité, et n'a investigué cet aspect dual des lahars. Compte-tenu de la spécificité des espaces volcaniques et des ressources qu'ils offrent, l'extraction des matériaux volcanoclastiques du Merapi est un cas d'étude permettant de mieux saisir la manière dont vivent les communautés de ce volcan. Les informations retirées devraient apporter un éclairage nouveau sur les lahars et les risques qu'ils représentent. Effectivement, les recherches conduites au Merapi ont étudié les dangers existant sur les interfluves (Lavigne, 1999 ; Lavigne et Thouret, 2002), mais ne se sont pas encore intéressés aux travailleurs situés dans les vallées et les rivières. Il manque donc une étude de ces espaces particuliers que sont les sites d'extraction pour une analyse plus complète des risques liés aux lahars au Merapi. En outre, mieux connaître l'activité d'extraction devrait prolonger les études de vulnérabilité en cours, en développant le thème du « sustainable livelihoods approach » (Kelman et Mather, 2008) pour une meilleure connaissance de l'ensemble des facteurs du risque. Au final, appréhender les lahars sous les deux facettes de l'aléa et de la ressource permettra d'améliorer la connaissance des vallées et rivières du volcan, et devrait représenter un apport profitable aux études en cours et futures, mais aussi participer à une vision systémique englobant les processus physiques et anthropiques à l'origine du risque.

Quel est l'intérêt d'une double analyse des lahars à la fois comme aléas, mais aussi comme les vecteurs d'une ressource, dans la compréhension des risques sur le volcan Merapi ?

1. Existe-t-il un risque de catastrophe lié aux lahars après l'éruption de 2010 ? L'exemple de la saison des pluies 2010-2011

- a. Dans un contexte postéruptif suivant une éruption de récurrence centennale, quelle est la fréquence d'occurrence des lahars ? Quelles sont les rivières les plus touchées ? Quelles sont les processus morphogènes des lahars ?
- b. Les populations sont-elles préparées ? Quelle est la perception de l'aléa ? Quels sont les enjeux ? Quels sont les dommages provoqués par les lahars ? Où sont-ils localisés ? Comment le risque est-il géré ? Par qui ?
- c. Quel est le volume de matériel transporté par les lahars ? Quelle est la forme des dépôts volcanoclastiques ? Quels en sont les principaux faciès sédimentaires (structure et texture) ? Quelles sont les caractéristiques granulométriques des sables ? Existe-t-il une répartition spatiale de différents types de sables ?

Cette partie mettra en évidence la formation des corridors de lahars sur un talus distal qui avait été épargné par les lahars pendant plusieurs années. Les rapides processus morphodynamiques associés à la formation de ces corridors sont à l'origine de nombreux dommages pour les populations riveraines. Enfin, les corridors de lahars sont composés de dépôts volcanoclastiques dont les caractéristiques sédimentaires sont exposées.

2. Comment fonctionne l'activité d'extraction des dépôts volcanoclastiques et en quoi permet-elle de mieux saisir les risques liés aux lahars du Merapi ?

- a. Que sont les « sites d'extraction » ? Quelle est leur importance au Merapi (flux, réseaux) ? Quelle a été leur évolution diachronique en termes de volumes extraits ? Comment s'organisent-ils ? Que représente-t-ils pour les populations du Merapi ?
- b. L'activité a-t-elle subi des modifications après l'éruption de 2010 ? Qui sont les travailleurs ? Connaissent-ils les dangers auxquels ils s'exposent ? Comment évaluer les risques sur les sites d'extraction ? Lesquels sont les plus dangereux et pourquoi ? Après l'éruption de 2010, quelle est la place de cette ressource, et de l'activité qu'elle entraîne, dans la compréhension de la vulnérabilité des communautés du Merapi ?

Cette dernière partie explore les fonctionnements spatiaux, sociaux et économiques des corridors de lahars identifiés précédemment, à travers l'étude des sites d'extraction qui s'y développent. Le premier objectif est de mieux connaître ces unités spatiales, et d'y étudier les risques liés aux lahars pour une meilleure prise en compte de tous les espaces exposés à cet aléa. Le second objectif est de s'intéresser à la place de l'activité d'extraction dans une vision systémique des risques au Merapi : cette activité contribue-t-elle à renforcer les communautés du volcan ? Ou bien les affaiblit-elle ?

Ce premier chapitre a détaillé le cadre géographique, le contexte scientifique et la problématique de la thèse. Cette nécessaire toile de fond a mis en avant les éléments suivants :

1. Le Merapi est un volcan composite bien connu, depuis les œuvres des naturalistes européens jusqu'aux travaux des géophysiciens, volcanologues et géographes des différents programmes de recherche internationaux. Son histoire géologique et l'évolution de ses dynamiques éruptives sont bien détaillées, mieux que celles de tout autre volcan indonésien. Ses éruptions fréquentes et son cadre culturel original ont amené très tôt sa surveillance et la modélisation des aléas associés.
2. Parmi eux, les lahars postéruptifs, déclenchés par les pluies, sont des éléments primordiaux de la géomorphologie volcanique, mais représentent une menace qui peut durer plusieurs années après une éruption. Identifiés comme des aléas majeurs ayant causé les plus grandes catastrophes volcaniques au XX^e siècle, les lahars ont des processus d'écoulement complexes dus à leur très haute concentration en matériel volcanoclastique de toutes dimensions, y compris des blocs massifs. La thèse, se positionnant dans le domaine de la géographie des risques, se propose d'en apporter une analyse originale, en considérant, en plus des dangers qu'ils représentent, la ressource en matériel minéral qu'ils déposent.
3. La géographie des risques intègre effectivement de plus en plus les ressources et moyens de subsistance des communautés pouvant être affectées par l'occurrence d'un aléa. La compréhension de la nature de ces ressources et de leur accessibilité est un aspect essentiel des études de vulnérabilité, de capacité et de résilience, à plus forte raison sur les espaces volcaniques. Il s'agit en effet d'espaces attractifs, marqués par les possibilités d'utilisation agricole, géothermales et touristiques des édifices volcaniques, ainsi que l'extraction des téphras et des laves fournissant des additifs et des matériaux de construction de premier ordre. Au Merapi, les dépôts volcanoclastiques laissés par les lahars représentent une ressource en matériel de construction pour la fabrication d'un béton d'excellente qualité très demandé. La thèse a ainsi pour objectif d'investiguer la question suivante : qu'apporte l'analyse de cette double facette des lahars, entre aléas et vecteurs d'une ressource prisée, à la géographie des risques du Merapi ? Cette vision intégrée des lahars n'a en effet pas encore été abordée dans la littérature abondante consacrée à ce volcan en particulier, et demeure encore peu explorée dans la littérature scientifique en général.

Chapitre 2 – Acquisition et traitement des données

L'étude de la mise en place des dépôts volcanoclastiques dans les bassins-versants du Merapi et de leur exploitation a nécessité une investigation répartie en plusieurs thématiques dont certaines ont pu être menées simultanément. Suite à l'éruption du Merapi en octobre-novembre 2010, la récurrence et l'ampleur des lahars ont conduit à un renforcement de l'analyse des lahars en tant qu'*aléas*, sans toutefois négliger la ressource que représentent leurs dépôts. Les travaux de terrain de la mission 2011 ont donc eu pour objectifs d'acquérir des données concernant les occurrences de lahars, leurs caractéristiques d'écoulement, leurs dépôts, ainsi que leurs impacts. Simultanément, une enquête par questionnaire a été mise en œuvre dans les sites d'extraction du Merapi afin de cerner leurs évolutions après l'éruption, et de pouvoir comprendre comment est produit le risque dans ces espaces directement exposés aux aléas. Le traitement du questionnaire a notamment permis une méthode d'étude des différents facteurs du risque pour chaque site d'extraction, afin de pouvoir non seulement classer les sites en fonction de leur valeur de danger, mais également afin de déterminer quels éléments nécessitent d'être corrigés pour chaque site, dans l'optique d'une réduction des risques adaptée.

L'objectif de ce second chapitre est de présenter au lecteur la méthodologie d'ensemble du travail de thèse : les méthodes d'acquisition des données, ainsi que la manière dont elles ont été traitées et analysées. La présentation générale ne traduit pas l'ordre chronologique des travaux, mais suivra plutôt une organisation thématique en détaillant d'abord comment ont été étudiés les lahars, leurs dépôts et leurs impacts géomorphologiques autour du Merapi. Dans un second temps, les méthodes d'enquêtes et de traitement des données seront expliquées.

I. Étudier les lahars et leurs corridors

L'étude des lahars comme aléas et du fonctionnement de leurs corridors a nécessité une approche en trois étapes : (1) définition d'un cadre spatio-temporel précis, (2) quantification et cartographie des impacts géomorphologiques, (3) sédimentologie des dépôts. La thèse est consacrée à l'étude des lahars survenus pendant la saison de mousson 2010-2011 ; la base de données, toutefois, recense les occurrences de lahars jusque fin janvier 2012.

1. Définir la chronologie et l'événementiel des lahars : constitution d'une base de données « lahars »

1.1 Composition de la base de données

La base de données « lahars » (annexe A.1) a été établie d'après des données primaires (observations directes) et des données secondaires issues de plusieurs sources. Pour chaque événement, ont été renseignés :

- la date
- la rivière où le lahar a eu lieu
- l'heure et/ou la durée de l'écoulement au site d'observation (généralement sur le talus médial, là où sont installées les caméras du BPPTK)
- la profondeur moyenne de l'écoulement au site d'observation
- des informations complémentaires (intensité et conséquences géomorphologiques, valeurs des précipitations)
- les victimes et les impacts sur les infrastructures
- la ou les source(s) des données.

Les deux premiers critères ainsi que la source existent pour chaque événement, tandis que les quatre autres n'ont pas pu être systématiquement renseignés. En cas d'absence d'information vérifiable, la mention « ? » a été utilisée.

1.2 Les données primaires

Seule une portion réduite de la base de données (3% de l'information) a été remplie par les observations directes sur le terrain, à cause d'un évident problème d'échelles induit par le sujet. Il s'agit tout d'abord d'un décalage temporel : les lahars ont commencé dès la première phase éruptive de l'éruption de 2010, tandis que les travaux de terrain n'ont débuté que trois mois plus tard. À ceci s'ajoute l'étendue du domaine d'étude, qui rend impossible la surveillance continue de l'ensemble des dix-huit rivières dans lesquelles les lahars sont susceptibles de se produire, parfois même simultanément. L'instrumentation systématique représentait, en outre, un surcoût et un délai imprévus que le cadre budgétaire du programme MIA VITA ne pouvait supporter. Les observations directes ne concernent donc que quelques événements, survenus dans les vallées où les lahars étaient les plus fréquents (Putih, Gendol, Boyong). Dans la plupart des bassins-versants, des informateurs locaux ont accepté de nous prévenir en temps réel par SMS en cas de lahar. Si ce système était efficace pour la Gendol, la Boyong, la Krasak, il demeurerait moins fiable ailleurs. Pour pallier ces difficultés inévitables, le recours à des données secondaires fiables et de natures variées était nécessaire.

1.3 Les données secondaires

Les données secondaires sont issues de cinq sources d'information : les archives du BPPTK, les articles de presse, les entretiens avec les usagers des vallées du Merapi (travailleurs, surveillants, marchands) ainsi que les enregistrements de vidéos amateurs, disponibles sur la plate-forme de diffusion *YouTube*. Le Tableau 6 détaille ces sources. Les archives du BPPTK (Bureau de Volcanologie de Yogyakarta) qui ont été utilisées proviennent des cahiers d'observation du Merapi, qui recensent notamment les occurrences de lahars. Il existe en outre, au bureau central, un réseau de caméras vidéo pour chaque vallée du Merapi, mais leur utilité ne dépasse pas celle d'un simple rôle de surveillance. Leur exploitation scientifique demeure compliquée : il n'y a pas d'enregistrement systématique des images, lesquelles sont prises chaque seconde, empêchant l'étude en continu d'un flux en mouvement.

Tableau 6 - Sources de la base de données "lahars 2010-2011"

Source	Type de document / méthode d'acquisition	Information donnée	Avantages	Limites	Part dans la base de données
Archives du Bureau de Volcanologie (BPPTK)	Comptes-rendus d'observation quotidiens des cinq observatoires permanents du Merapi (cf. chap. 1)	Rivières empruntées par les lahars. Date ; heure de début et de fin au niveau des observatoires. Parfois : épaisseur moyenne de l'écoulement.	Série chronologique à très haute fiabilité. Quelques informations complémentaires (relevés pluviométriques notamment).	Pas de mesure systématique de l'épaisseur. Pas d'enregistrement vidéo des événements depuis les caméras fixes. Aucune information hydrologique.	78%
Entretiens avec les usagers des vallées (carriers, surveillants, marchands)	Entretien directif sur la fréquence d'occurrence des lahars.	Chronologie approximative.	Mise en évidence des événements les plus marquants.	Chronologie incertaine. Permet d'obtenir des informations sur les événements survenus en fin de journée ou début de soirée (pas d'image possible).	19%
Enregistrements vidéo amateurs	Vidéos basse résolution, transmises directement ou visionnées sur la plateforme YouTube.	Date d'un événement particulier. Heure parfois mentionnée.	Information qualitative sur la dynamique d'un écoulement. Détail de l'effondrement de certains ouvrages d'art (ponts, barrages...). Information sur les réactions des populations face aux lahars.	Pas d'enregistrement du flux en continu. Mesure impossible des données hydrologiques (vitesse, débit). Mauvaise résolution de l'image, qualité médiocre et courte durée. Dépend de la lumière du jour. Localisation parfois incertaine.	3%
Articles de presse	Textes rédigés par les quotidiens nationaux <i>Java Pos</i> , <i>Kompas</i> , <i>Kedaulatan Rakyat</i> (KR).	Vallées empruntées par les lahars. Date de l'événement. Durée parfois mentionnée. Dommages.	Série chronologique. Informations sur les dégâts provoqués par les événements.	Pas d'informations sur les caractéristiques physiques du flux. Confusion entre crues hydrologiques et lahars. Dégâts à vérifier auprès des institutions locales.	(annexe A.3)

La transmission est parfois longue, avec des délais supérieurs à la prise d'image, et la résolution de médiocre qualité. Si les archives du BPPTK, à part les vidéos, représentent un ensemble de données fiables, elles ne sont pas exemptes de certaines lacunes, notamment pour les premiers lahars qui se sont produits dès le début de l'éruption. Pendant cette période, le personnel se consacrait entièrement à l'étude de l'éruption ; en outre, les cinq observatoires situés sur les flancs du volcan n'étaient que sporadiquement occupés. La surveillance des lahars par le BPPTK est donc incomplète jusqu'à la mi-décembre 2010. Pour compléter la base de données, il a donc fallu enquêter auprès des populations locales et notamment les usagers des rivières pour reconstituer les événements jusqu'au début du mois de novembre 2010. Les entretiens ont été menés de manière directive, à partir de questions concernant les lahars pendant l'éruption, et plusieurs personnes ont été interrogées pour une même rivière, dans le souci de réduire les biais et de corriger d'éventuelles erreurs. La datation était relativement aisée, puisque les interlocuteurs s'aidaient de la chronologie des différentes phases éruptives et de certains événements marquants (mort du chaman Maridjan, variations des limites de la zone de danger maximal, coulées et déferlantes pyroclastiques de très forte magnitude le 5 novembre 2011). Enfin, pour apporter des dates voire des heures précises, le réseau *YouTube* s'est révélé d'une grande utilité : la plupart des auteurs des vidéos ont été contactés, et ont pu préciser la date à laquelle ils avaient effectué leur enregistrement. Ces dernières (voir annexe A.4), cependant, sont souvent d'une très faible résolution et d'une durée très restreinte et empêchent l'analyse quantitative de l'écoulement représenté. L'usage des vidéos a donc été très largement limité au calage de la chronologie.

L'usage des journaux est resté parcimonieux, et n'a guère servi qu'à compléter quelques informations sur les dommages, qui ont ensuite été vérifiées par les entretiens et les rapports issus des institutions. En effet, la lecture des articles de presse n'est guère aisée concernant les lahars, qui sont souvent mal compris par les journalistes qui ont tendance à utiliser indifféremment les termes d'inondation (*banjir*) et de lahars. Ces deux vocables désignent certes tous deux des élévations parfois rapides du débit des rivières, mais les processus qui les commandent et surtout les effets qui en découlent ne sont pas les mêmes. On trouvera une liste des articles de presse utilisés et de leur source en annexe A.3.

Dans le cas où plusieurs sources se rejoignent sur un événement, seule la source la plus fiable a été indiquée. La base de données peut être considérée comme fiable : une grande partie des informations qui la nourrissent proviennent d'une institution scientifique, et les lacunes qui y ont été repérées ont été comblées à l'aide de sources diverses recoupées entre elles.

1.4 Imagerie satellitaire et photographies aériennes

Enfin, les données nécessaires à l'étude des impacts des lahars ont été obtenues à partir d'un jeu d'images satellites diachroniques du volcan Merapi (Figure 19, Tableau 7) obtenu dans le cadre du programme MIA VITA. À partir de l'image GeoEye en couleurs réelles, les dépôts ont pu être digitalisés sous ArcGIS pour en déterminer la forme planimétrique. Les berges de certaines rivières ont également été cartographiées afin de pouvoir estimer leur recul. Les dépôts étant très récents, leur détection n'a pas nécessité de traitement numérique d'image, comme cela peut être fait pour certaines vallées où les dépôts sont peu évidents (Joyce *et al.*, 2009). Les images satellites ont également servi à l'étude diachronique des parties distales de la Putih et de la Gendol, pour étudier les impacts des lahars sur le réseau hydrographique. Enfin, les sites d'extraction ont pu être analysés par photo-interprétation également : repérage de leurs caractéristiques principales (carrières, chemins d'exploitation), cartographie, calculs de superficie. La grande limite de ces images est leur couverture inégale, surtout pour le jeu de donnée récent (GeoEye) qui ne couvre qu'une partie du versant méridional.

Pour mieux saisir l'organisation générale d'un site d'extraction, une série de photographies aériennes verticales ont été prises par Ultra-Léger Motorisé (ULM) en septembre 2010 au-dessus des carrières aménagées dans la rivière Gendol au niveau des villages Jambu et Kaliadem. Les images ont aidé à comprendre l'organisation structurelle des sites.

Tableau 7 - Imagerie satellitaire et photographies aériennes utilisées dans la thèse

Image	Traitement	Date d'acquisition	Résolution	Utilisation
GeoEye	Vraies couleurs (Bleu-Vert-Rouge)	11 juin 2011	0,5 m / pixel	Étude des impacts des lahars sur le versant occidental
U.L.M.	Vraies couleurs (Bleu-Vert-Rouge)	28 août 2010	1 m / pixel	Étude du site d'extraction de Jambu-Kaliadem en 2010
Spot 5	Composition colorée (Vert-Rouge-PIR)	15 novembre 2010	2,5 m / pixel	Fond de carte pour l'analyse diachronique
Spot 5	Composition colorée (Vert-Rouge-PIR)	17 mai 2008	2,5 m / pixel	
Quickbird	Vraies couleurs (Bleu-Vert-Rouge)	2006	0,6 m / pixel	Étude du site d'extraction de Jurangjero en 2006

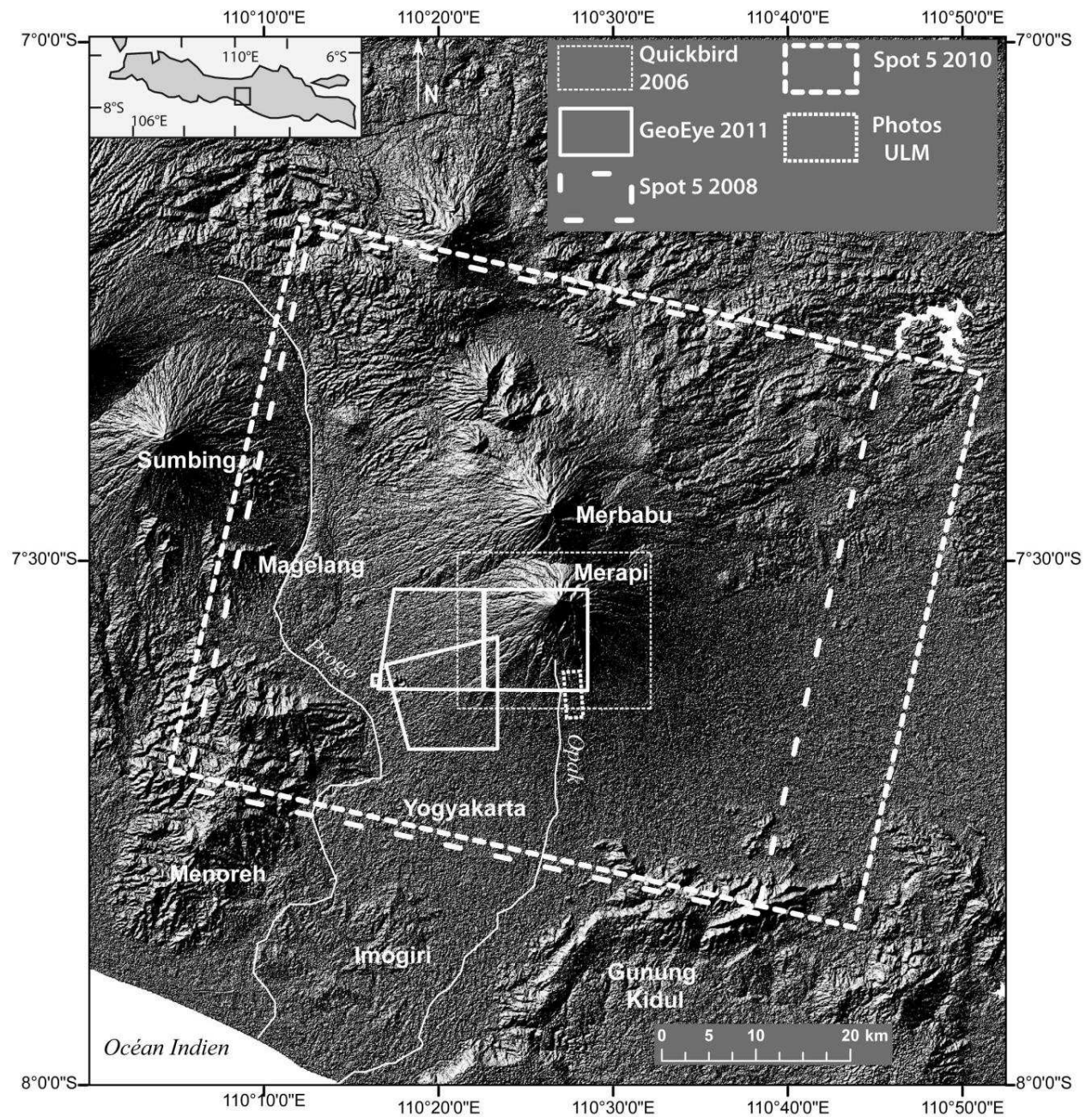


Figure 19 - Couverture des images satellites et aériennes
(fond de carte : modèle numérique de terrain ASTER GDEM)

2. Caractériser le fonctionnement des corridors de lahars

2.1 L'impact des lahars sur la morphologie des rivières

Les impacts des lahars sur la forme des rivières sont doubles : il s'agit à la fois de dynamiques d'érosion, qui se traduisent par l'élargissement et l'incision des chenaux, mais également de dynamiques de déposition et d'aggradation, marquées par l'accumulation du matériel volcanoclastique. L'investigation de terrain a commencé par la recherche de sites où les estimations d'érosion et d'accumulation pouvaient être effectuées (Figure 20).

2.1.1 Sur les talus proximal et médial

Les talus proximal et médial correspondent à la zone de déclenchement et de transport des lahars dans des secteurs à pente forte où les écoulements tendent à incorporer des débris à leur masse. La méthode combine mesures topographiques au télémètre laser et analyse diachronique d'images satellites. Deux cas de figures doivent être abordés en fonction du substrat sur lequel s'écoulent les lahars.

- Le cas des corridors de lahars

Il s'agit de vallées formées sur les talus proximal et médial par les lahars holocènes. Le lit mineur des rivières n'occupe qu'une petite partie du fond de vallée, mais les lahars s'écoulent sur toute sa largeur et contribuent à son élargissement et à son incision. Les rivières Senowo et Putih ont été choisies car les impacts y sont bien visibles et bien repérables avec GeoEye. Dans le premier cas, les berges de la Senowo ont subi sur leur partie médiale un sapement qui a provoqué la disparition de plusieurs hectares de rizières. Grâce à une analyse diachronique des images satellites Spot 5 2008 et GeoEye 2011, le recul des berges a été cartographié, et la surface des rizières qui ont disparu a été évaluée. Au contraire, dans le cas de la Putih, l'élargissement des berges demeure imperceptible, mais en revanche l'incision du fond de vallée par les lahars est nettement visible sur le terrain et a pu être mesurée au télémètre sur une section d'une longueur 2 km à Jurangjero (talus médial), pour établir une estimation du volume érodé par les lahars (Figure 20).

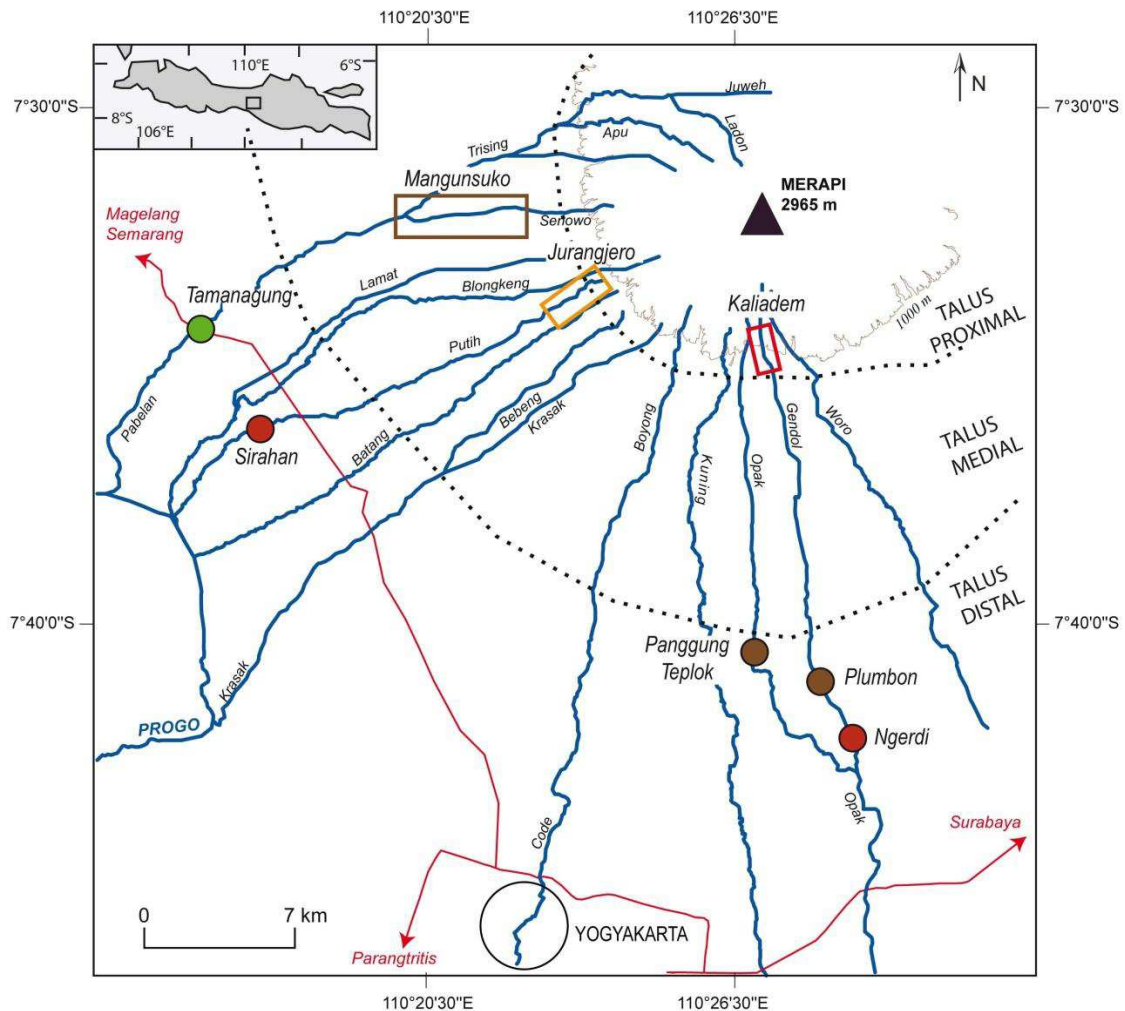
- Les lahars qui circulent dans des fonds de vallée remplis par les dépôts pyroclastiques de l'éruption de 2010

Dans le cas de la Gendol, la vallée a été partiellement comblée par les dépôts de l'éruption de 2010. L'incision du matériel pyroclastique de 2010 a été étudiée sur une section à Kaliadem (talus proximal), à l'aide de mesures réalisées au télémètre couplées à l'analyse diachronique des images satellites Spot 5 2008 et GeoEye 2011. Le volume de matériel pyroclastique érodé par les lahars a ainsi pu être estimé sur une section de 1 km, et peut être comparé au volume remobilisé sur la Putih, dans un contexte différent (Figure 20).

2.1.2 Sur le talus distal : caractériser la formation des corridors de lahars

La partie distale des rivières radiales du Merapi circule dans un contexte topographique différent, puisque les cours d'eau ne sont plus encadrés par de hauts versants. Les lahars du XX^e siècle n'ont pas souvent atteint le talus distal, et leurs corridors demeuraient souvent difficiles à détecter. Après l'éruption de 2010, les lahars se sont écoulés jusque sur le talus distal, et ont ainsi (re)formé leurs corridors, élargissant et incisant les chenaux sous-dimensionnés des rivières. Les sites où les changements apparaissent les plus rapides et les plus riches d'enjeux (présence de villages, notamment) ont été plus précisément étudiés (Figure 20) : aval de la Pabelan (Tamanagung), aval de la

Putih (Sirahan), aval de la Opak (Panggung-Teplok), aval de la Gendol (Ngerdi). La méthode combine l'examen du réseau à l'échelle locale à l'aide de l'image satellite Spot 5 de 2008, puis la reconstitution du tracé en 2011 à l'aide d'observations directes réalisées sur le terrain, au télémètre laser et au GPS. Lorsque la couverture de l'image satellite GeoEye le permettait, celle-ci a été utilisée (aval de la Putih). Ailleurs, les impacts ont été cartographiés directement sur le terrain par GPS.



	SUR LES TALUS PROXIMAL ET MEDIAL	SUR LE TALUS DISTAL
Corridor de lahars préexistant, réactivé en 2010-2011	<div style="border: 1px solid orange; width: 20px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Exemple d'érosion des berges <div style="border: 1px solid orange; width: 20px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Exemple d'incision des chenaux	<div style="background-color: green; width: 10px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Exemple des débordements sur les terrasses dans un corridor de lahar <div style="background-color: orange; width: 10px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Exemple d'incision des chenaux
Dynamiques de formation de corridors de lahars	<div style="border: 1px solid red; width: 20px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Exemple d'incision des dépôts pyroclastiques ayant comblé un corridor de lahars	<div style="background-color: red; width: 10px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Exemples de défluviations <div style="background-color: brown; width: 10px; height: 10px; display: inline-block;"></div> Exemples d'érosion des berges

Figure 20 - Carte des sites d'étude retenus pour caractériser l'impact des lahars sur la morphologie des rivières

2.1.3 Estimer l'intensité des lahars majeurs

La base de données montre l'occurrence de cinq lahars majeurs, ayant atteint plus de 25 km d'extension et ayant provoqué de lourds dommages : les 29 novembre 2010, 19 mars et 1^{er} mai 2011 dans la Boyong-Code, le 9 janvier 2011 dans la Putih, le 30 mars 2011 dans la Pabelan. En l'absence d'un matériel de détection systématique, l'intensité (débit) de ces événements n'est pas mentionnée dans les rapports du BPPTK. Pour pallier cette lacune, il a fallu l'évaluer ponctuellement à partir de traces laissées par le flux sur le bâti, notamment les *mudlines* qui renseignent la profondeur du flux (Figure 21, Tableau 8). Ces éléments permettent de donner un ordre de grandeur de l'intensité des lahars les plus importants de la saison des pluies 2010-2011 en un point donné de leur parcours. Toutefois, cette méthode ne fonctionne pas pour la plupart des autres événements : si un lahar n'a provoqué aucun dommage, les riverains ne prennent pas la peine d'en noter l'heure précise de passage ; les données du BPPTK également ne mentionnent pas systématiquement la largeur ou la profondeur du flux si celui-ci n'apparaît pas exceptionnel. En outre, le passage successif de plusieurs événements mineurs a tôt fait d'en effacer les dépôts plus anciens ; dans cette dynamique morpho-sédimentaire particulièrement rapide, seules les marques des lahars les plus importants demeurent visibles longtemps. L'apport de la vidéo, notamment les enregistrements chargés sur des plates-formes comme *YouTube*, a toutefois permis de reconstituer quelques événements lorsque la résolution s'y prêtait (cf. *infra* 2.3)



Figure 21 – Exemples des évidences laissées par le passage des lahars. A : *mudline* sur un édifice pour estimer la profondeur maximale du flux au lieu d'observation (cliché E. de Bélizal, mai 2011). B : hauteur du tablier du pont de Srumbung dans la Putih en fonction duquel la profondeur des lahars peut être évaluée (capture de la vidéo de surveillance du BPPTK, septembre 2012). C : forme des dépôts dans la Putih à Srumbung : la largeur des dépôts permet d'en déduire celle du flux qui les a mis en place ; la disposition des anciens dépôts permet d'estimer la largeur et éventuellement la profondeur d'un lahar de plus grande dimension, dont la datation demeure toutefois ardue en l'absence d'enregistrements systématiques (cliché F. Lavigne, janvier 2011).

Tableau 8 - Documents et évidences de terrain utilisés pour l'évaluation des débits de pointe des lahars majeurs

Lahars	Éléments de reconstitution de l'intensité des lahars
29 novembre 2010, 19 mars et 1^{er} mai 2011 dans la Boyong et la Code	Vitesse estimée d'après vidéo amateur réalisée à Yogyakarta au pont de Kota Baru. Largeur et profondeur au même endroit d'après photographies et marques de terrain (<i>mudlines</i> et extension des dépôts).
9 janvier 2011 dans la Putih	Vitesse estimée d'après les rapports du BPPTK (heure de passage du front à l'observatoire de Ngepos puis à Jumoyo). Largeur et profondeur à Ngepos d'après les données du BPPTK.
30 mars 2011 dans la Pabelan	Vitesse estimée d'après les rapports du BPPTK (heure de passage du front à l'observatoire de Babadan puis à Tamanagung). Largeur et profondeur estimée à Tamanagung d'après évidences de terrain au lendemain du lahar (endommagement des piles du pont, largeur et épaisseur des dépôts).

2.2 Quelques mesures complémentaires : l'apport de la vidéo

La dynamique des lahars ne représente pas l'aspect central de ce travail, mais l'impasse ne pouvait être totalement faite sur le comportement de ces écoulements, nécessaire à clarifier si l'on veut saisir les dangers qu'ils représentent et les dépôts qu'ils produisent. L'exploitation d'images des écoulements en mouvement a pu se révéler riche d'informations. L'utilisation d'enregistrements vidéo est une technique souvent utilisée pour l'étude des paramètres hydrologiques des lahars (Lavigne *et al.*, 2003 ; Thouret *et al.*, 2007 ; Gomez et Lavigne, 2010 ; Okano *et al.*, 2012) ou des coulées de débris non volcaniques (Berti *et al.*, 2000 ; Marchi *et al.*, 2002). En raison d'un faible dispositif technique d'enregistrement sur les 17 rivières du Merapi, l'acquisition de vidéos personnelles est demeurée aléatoire. Les données retirées des quelques lahars qui ont pu être filmés viennent en accompagnement mais ne peuvent être exploitées ni extrapolées pour détailler la dynamique générale des lahars du Merapi en 2010-2011 (Figure 22, Tableau 9). Les résultats cependant apportent des informations sur les caractéristiques du flux, notamment sur le talus distal, où l'expansion des lahars a été assez peu fréquente et peu étudiée au Merapi.

La démarche préparatoire du travail d'analyse consiste en la réalisation d'un profil transversal de la vallée au télémètre laser (Figure 23). Des objets fixes et de préférence massifs (bâtiments ou infrastructures) sont repérés et cartographiés afin d'obtenir des mesures en long nécessaires à l'interprétation des enregistrements vidéo. En effet, lorsqu'un lahar se produit, il est filmé selon le cadrage le meilleur mais également le moins dangereux. Le front ou les premières pulsations des lahars sont enregistrés pendant au moins 30 min ; d'autres prises de vue ont pu être réalisées sous d'autres angles (aval d'un barrage ou d'un pont, si le début de l'enregistrement s'était focalisé sur l'amont). L'étude des prises de vues permet ensuite de calculer, selon des pas de temps prédéterminés, les variations du débit, considéré comme le produit de la section mouillée (en m²) par la vitesse de surface de l'écoulement (en m/s). L'estimation de la seule vitesse de surface implique une légère surestimation de la vitesse du flux. Les paramètres hydrologiques et rhéologiques complets (vitesse interne, angles de friction basal et interne...) ne rentrent pas dans le cadre de cette étude.

Les sites d'observations retenus se situaient à proximité des sites d'extraction pour permettre l'étude simultanée des deux thématiques de la thèse. En apportant une donnée image datée, les vidéos personnelles pallient le manque d'instrumentation suite aux destructions massives de matériel par l'éruption, sans toutefois s'y substituer puisqu'elles ne filment qu'une partie des lahars, et ce avec des appareils à basse résolution. La prise d'image est en outre très dépendante de la luminosité ; comme beaucoup de lahars se produisent en fin d'après-midi autour de 16h et que le soleil se couche entre

17h30 et 18h00, le délai d'enregistrement est assez réduit. Le lahar du 19 mars n'a ainsi pas pu être enregistré, quand bien même il s'agissait de l'un des plus importants, car il a atteint Yogyakarta vers 18h30.

L'information de quelques événements a pu toutefois être exploitée pour apporter quelques précisions chiffrées quant au rôle dynamique des aménagements sur l'intensité des lahars. L'ensemble de ces mesures constitue un complément d'information de quelques événements de lahars, utiles pour éclairer la chaîne de processus depuis l'écoulement jusqu'aux dommages, mais ne représente pas la finalité première de cette thèse.

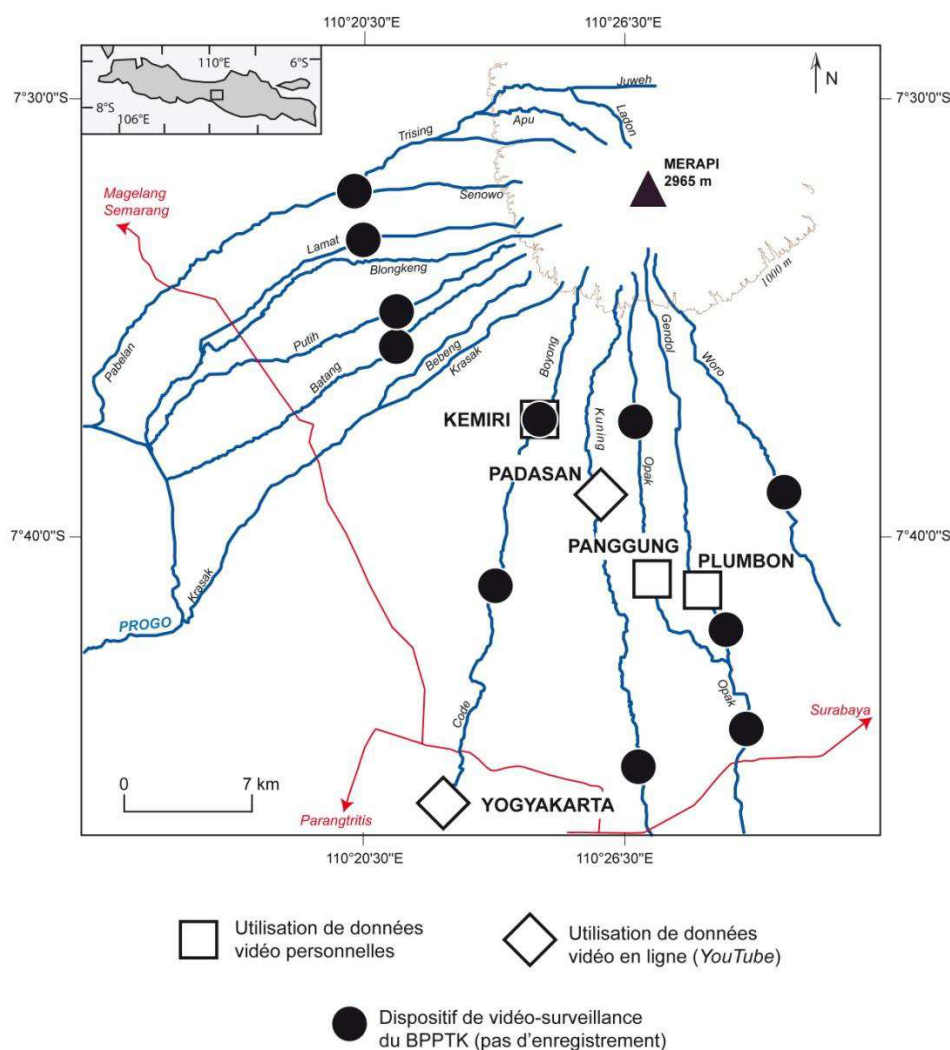


Figure 22 - Enregistrement et surveillance vidéo des lahars du Merapi en 2011

Tableau 9 - Vidéos personnelles

Date	Vallée	Prises de vue	Durée
28/02/2011	Gendol	Plumbon Amont aval	52 min
07/03/2011	Boyong	Kemiri	15 min
14/03/2011	Gendol	Plumbon amont	46 min
21/03/2011	Gendol	Plumbon Amont Aval	49 min
22/03/2011	Opak	Panggung	34 min

A



B



Figure 23 - Exemples de prises de vue pour l'analyse vidéo des lahars. A : site de Kemiri, Boyong. B : site de Plumbon, Gendol. Le champ de vision de la caméra est symbolisé par un triangle rouge sur les vues aériennes des corridors de lahars (images GoogleEarth, 2011). Le déplacement d'éléments flottés (débris végétaux notamment) sur les ponts dont la largeur est connue permet d'estimer la vitesse.

3. Caractériser les dépôts volcanoclastiques : morphologies, faciès sédimentaires et textures

3.1 Localisation, forme et planimétrie

De la même manière que les lahars et leurs impacts, les dépôts qu'ils ont laissés ont été analysés sur l'ensemble de l'édifice du Merapi. L'imagerie satellite GeoEye 2011 a permis la cartographie précise des dépôts sur la quasi-totalité des flancs occidentaux du volcan. Demeurent toutefois deux limites :

- Une certaine imprécision quant au début de la zone de déposition dans les fonds de vallée du talus proximal. Pour les rivières du versant septentrional, situées à plus haute altitude (Ladon, Juweh), la cartographie a commencé à l'isohypse 1500 m. Pour celles des secteurs occidental et méridional, la digitalisation a débuté à l'isohypse 1200 m, mais il ne s'agit que d'une borne théorique.
- La couverture des images satellites ne prend pas en compte l'ensemble de l'extension distale des rivières du volcan. Les confluent entre le Progo et ses tributaires venus du

Merapi n'apparaissent pas sur les images GeoEye de 2011. Pour combler cette lacune, l'extension distale des dépôts a été cartographiée d'après une série de points GPS réalisés sur le terrain. Ainsi, la partie la plus distale de la cartographie des dépôts est réaliste, mais approximative.

La cartographie des dépôts permet de calculer la surface de déposition S , et de proposer une estimation des volumes déposés V_m en estimant que $V_m = S \times T$, où T désigne l'épaisseur (*thickness*) des dépôts (Waythomas *et al.*, 2012). Leur estimation demeure faisable dans les parties des dépôts incisées par le lit mineur, qui permet souvent de mettre en évidence la stratigraphie volcanoclastique récente au-dessus du *bedrock*. Les rivières ont été découpées en plusieurs secteurs, dont le nombre varie selon l'évolution de la pente ou selon le nombre d'infrastructures comme les barrages à sédiments (*sabo-dam*) qui créent des ruptures notables dans la forme planimétrique des dépôts. Des rivières très aménagées mais peu frappées par les lahars comme la Lamat ou la Blongkeng sont donc très fortement divisées, tandis que d'autres où les aménagements ont vite été ensevelis comme la Gendol ou la Boyong possèdent moins de sections. L'estimation des volumes de dépôts volcanoclastiques par section est donc possible. On gardera à l'esprit qu'il s'agit d'une méthode palliant l'absence au moment de la thèse de MNT récent à haute résolution, et que les résultats obtenus demeurent une évaluation *a minima* appelant à être complétée plus tard.

3.2 Faciès sédimentaires

L'étude des dépôts s'est focalisée, ensuite, sur l'individualisation de coupes stratigraphiques (Figure 24), ainsi que de leur analyse sédimentologique (étude de structure sédimentaire et de texture granulométrique). Les coupes présentées proviennent des différents talus du volcan et ont été levées sur l'ensemble de l'édifice. L'analyse des structures sédimentaires s'est faite *in situ*, et a été soutenue par photographie ensuite. La texture a été analysée à l'aide de l'analyse granulométrique d'échantillons au laboratoire d'hydrologie de l'Université Gadjah Mada de Yogyakarta. Les échantillons prélevés font 5 kg, et comportent chacun une grande gamme granulométrique depuis les argiles vers les cailloux puisque le laboratoire effectue des mesures granulométriques sur des particules dont la taille maximale est de 90 mm. Le protocole expérimental procède classiquement, d'abord par le tamisage à sec des particules grossières. Les fractions fines sont déterminées selon la méthode de pipetage (méthode de Robinson), qui met en évidence la différence de vitesse de sédimentation entre les éléments les plus fins et les plus gros. Au final, les résultats ont été traités par statistique descriptive (fréquences simples, fréquences cumulées, médiane, moyenne).

L'analyse des clastes de grandes dimensions a été complétée par traitement photographique, selon la méthode de B. Bernard (2008). Pour chaque unité stratigraphique comportant des cailloux et des blocs n'ayant pu être échantillonnés a été dégagée une fenêtre de dimension 100 × 100 cm ou 80 × 80 cm, divisée ensuite en une grille à maillage régulier (5 × 5 cm ou 4 × 4 cm). Ce tamisage virtuel permet de recenser pour chaque unité surfacique les dimensions des clastes les plus grands, en individualisant les éléments refusés à 256 mm, 64 mm et 32 mm (classification granulométrique de Wentworth, 1922) pour un aperçu plus complet des différentes dimensions des matériaux volcanoclastiques. Les analyses sédimentologiques de structure et de texture permettent de distinguer plusieurs faciès sédimentaires, révélant les types de matériel volcanoclastiques transportés, et apportant des indications sur les aléas auxquels sont exposés les riverains.

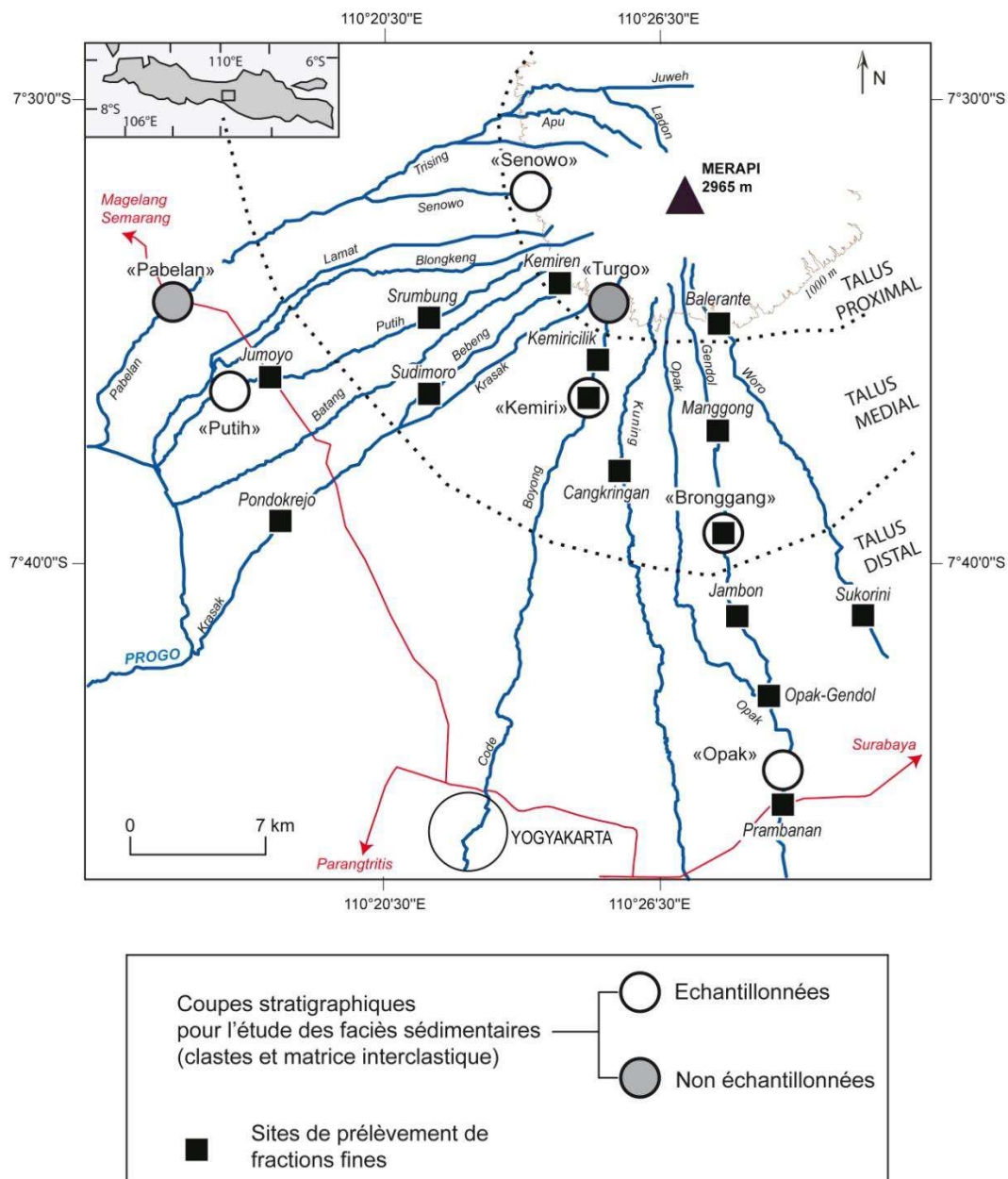


Figure 24 - Coupes stratigraphiques et échantillons pour l'analyse granulométrique

3.3 L'analyse des sables volcanoclastiques

La thèse s'intéressant à l'exploitation des dépôts volcanoclastiques, et notamment des sables grossiers utilisés pour fabriquer du béton, il est apparu nécessaire de fournir une présentation des composantes granulométriques des fractions sableuses qui forment la matrice sédimentaire des dépôts volcanoclastiques. L'objectif de cette analyse est de distinguer les zones où le sable grossier domine (qualité de sable optimale) et celles où les sables sont plus fins (qualité moindre). Des échantillons de 1 kg ont été récupérés sur les différentes parties (proximales, médiales et distales) des rivières dans lesquels existe une activité d'extraction (Figure 24), la plupart du temps dans les carrières elles-mêmes. Les sédiments récupérés ont été séchés, puis ensuite tamisés à 2 mm pour en retirer les graviers, avant d'être analysés par diffraction laser au granulomètre Coulter. Le traitement statistique des données s'est doublé d'une analyse analytique de la forme des distributions par le calcul des paramètres granulométriques d'Inman (1952) et ceux de Folk et Ward (1957) :

$$\text{Moyenne } M_z = \frac{Q_{16} + Q_{50} + Q_{84}}{3} \text{ (Folk et Ward, 1957)}$$

$$\text{Standard deviation } \sigma = \frac{Q_{84} - Q_{16}}{4} + \frac{Q_{95} - Q_5}{6,6} \text{ (Folk et Ward, 1957)}$$

$$\text{Kurtosis } K_G = \frac{Q_{95} - Q_5}{2,44(Q_{75} - Q_{25})} \text{ (Folk et Ward, 1957)}$$

$$\text{Skewness } S_K = \frac{Q_{16} + Q_{84} - 2Q_{50}}{Q_{84} - Q_{16}} \text{ (Inman, 1952)}$$

avec Q : quantiles des distributions statistiques des tailles des particules des échantillons.

Les résultats des analyses granulométriques des échantillons d'analyse des faciès sédimentaires et ceux d'analyses des sables sont donnés préférentiellement en échelle phi (ϕ) selon laquelle :

$$\phi = -\log_2 D$$

avec D : diamètre en mm des particules.

La *Standard deviation* σ (écart-type) détermine le tri du matériel prélevé ; le *Kurtosis* K_G et le *Skewness* S_K donnent des indications sur la logique de distribution statistique des diamètres. L'échelle ϕ permet d'effectuer une normalisation internationale des différentes échelles granulométriques (annexe C.1). Les classes granulométriques adoptées dans la thèse sont celles de Wentworth (1922), qui sont fréquemment utilisées dans les études sédimentologiques des dépôts volcanoclastiques. La coupure des argiles à 2 μm (0,002 mm soit 9 ϕ) est un équivalent laser qui peut sous-estimer le pourcentage d'argiles mais qui n'affectera pas les résultats de manière significative compte tenu de la faible quantité d'argiles dans les dépôts de lahars du Merapi (Lavigne et Thouret, 2002).

II. Du risque à la ressource : enquêtes et questionnaires

1. Perception et connaissance : questionnaire au début de la saison des pluies 2010-2011

1.1 Objectifs

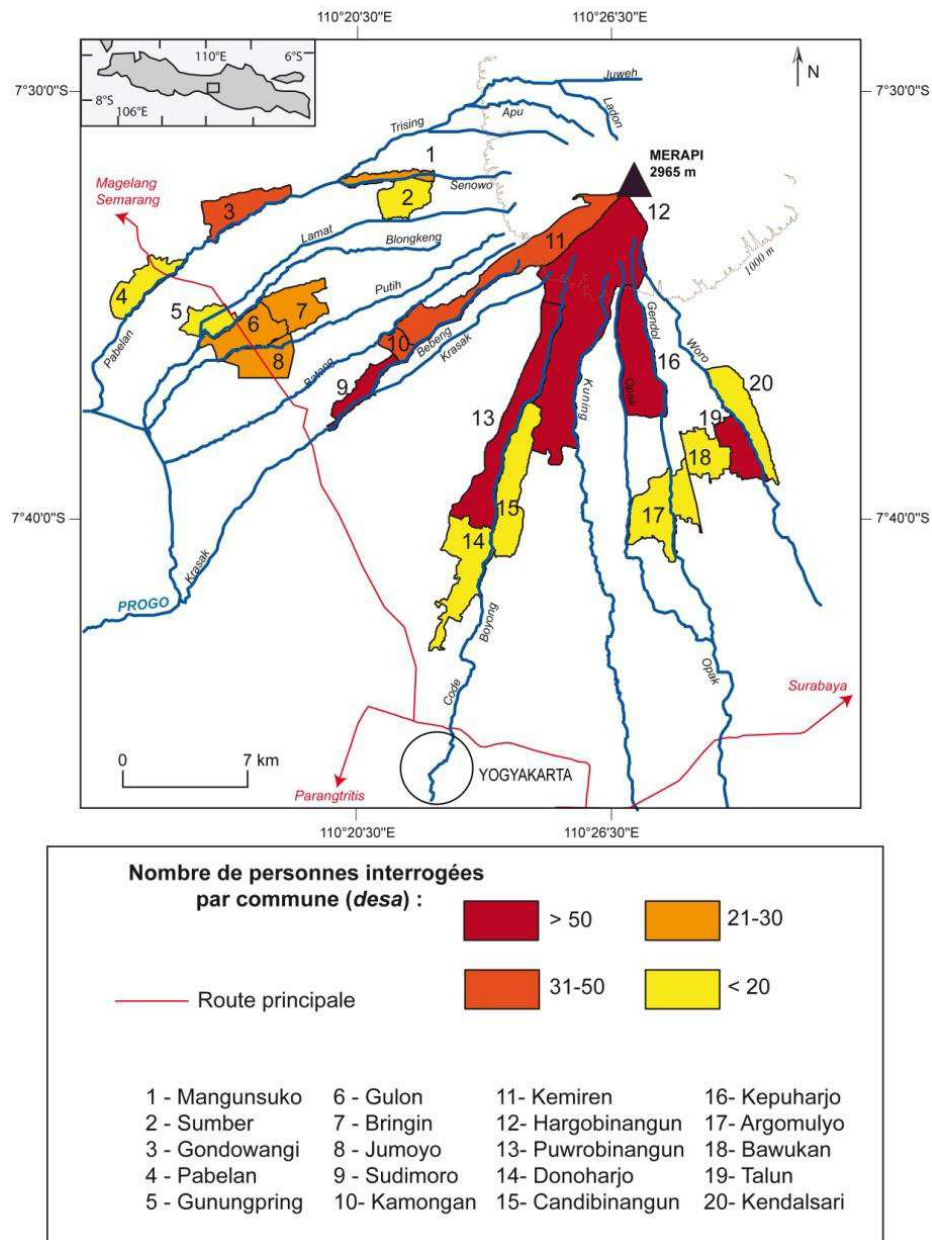


Figure 25 - Communes choisies pour l'enquête de perception par questionnaire et effectifs de répondants par commune

Afin de pouvoir appréhender le niveau de préparation des populations exposées aux lahars, une enquête par questionnaires systématiques a été réalisée en décembre 2010 dans les huit bassins-versants des tributaires du Merapi (Introduction). L'objectif est de déterminer si les populations du Merapi vivant sur des espaces où l'aléa est susceptible de provoquer des dommages connaissent les

dangers auxquels elles sont exposées, selon une méthode très souvent utilisée (Dominey-Howes et Minos-Minopoulos, 2004 ; Barberi *et al.*, 2008). Le questionnaire de perception et de connaissance de l'aléa a été effectué dans 20 communes (*desa*) situées le long des rivières Senowo, Pabelan, Blongkeng, Putih, Bebeng, Boyong, Kuning, Gendol, Woro, choisies pour les nombreux lahars historiques qui les ont traversées (Figure 25; Annexe D.1). Les sites d'enquête sont situés aussi bien sur la partie proximale que sur la partie médiale ou distale des rivières. Le traitement statistique des questionnaires devrait permettre d'évaluer la perception de l'aléa et des dangers qu'il peut représenter, et de déceler d'éventuelles logiques de répartitions spatiales entre des espaces plus ou moins bien préparés aux lahars.

1.2 Protocole d'enquête et d'analyse

Les questions ont été posées directement aux répondants lors de rencontres qui n'excédaient pas 20 min. Les enquêtes ont été réalisées très rapidement après la fin de la phase d'urgence de l'éruption de 2010 lorsque les personnes évacuées ont pu commencer à rentrer chez elles (à partir du 3 décembre 2010). L'idée était de pouvoir effectuer un premier diagnostic de la connaissance de l'aléa et de la perception du danger au moment où les riverains allaient être pleinement menacés par les lahars.

La formulation des questions a été choisie pour éviter toute ambiguïté de termes, et la plupart des questions traitant des caractéristiques de l'aléa lahar lui-même ne nécessitaient qu'une réponse de type « vrai ou faux », afin de s'adapter à un très large public (annexe D.1.1). Le questionnaire a été élaboré en langue indonésienne, et a été posé aux répondants par quatre enquêteurs d'origine javanaise connaissant les codes culturels nécessaires pour mettre en confiance les interlocuteurs (Tableau 10). Étudiants en fin de premier cycle de géographie à l'Université Gadjah Mada de Yogyakarta, ils connaissent déjà le Merapi pour y avoir fait des stages, et sont rompus aux techniques fondamentales des enquêtes par questionnaire.

L'échantillonnage était aléatoire, mais les enquêteurs avaient pour consigne d'équilibrer le choix des répondants entre hommes et femmes, et entre jeunes et plus âgés. Au final, 630 personnes ont été rencontrées et 357 hommes et 268 femmes âgés de 9 à 81 ans (37,7 ans de moyenne d'âge, effectif $n=625$) ont accepté de répondre intégralement au questionnaire. Les personnes ont été rencontrées chez elles, à condition que leur habitation soit localisée à moins de 300 m des berges des rivières, ce qui explique le nombre variable des effectifs par site (Tableau 10).

Les deux premières questions renseignent l'identité du répondant (âge et genre), tandis que les neuf suivantes renseignent sur la perception de l'aléa (le répondant a-t-il peur des lahars ?) et sur la connaissance de ses fonctionnements et conséquences (définition, vitesse approximative d'écoulement, impacts sur le bâti et les infrastructures...), voir annexe D.1.1.

L'analyse des données se fait par statistiques descriptives pour dégager les principales tendances et logiques spatiales de la perception de l'aléa des répondants. Ensuite, un traitement bivarié (tableaux de contingence) a amorcé une tentative d'explication de quelques variables, pour prolonger l'analyse de perception d'aléa (annexe D.1.2).

Tableau 10 - Enquêteurs, sites, dates et effectifs du questionnaire de perception 2010

RIVIÈRE	COMMUNE (desa)	ENQUÊTEURS	JOUR D'ENQUÊTE	NOMBRE DE PERSONNES INTERROGÉES	
				SITE	RIVIÈRE
SENOWO	Mangunsuko	Misqi	12/12/2010	30	45
		Akhati Muflikah			
		Indira Dwi Ariani			
	Sumber	Frida Nugraheni		15	
PABELAN	Gondongwangi	Frida Nugraheni	09/12/2010	30	35
	Pabelan			5	
BLONGKENG	Gulon	Frida Nugraheni	11/12/2010	20	55
	Gunungpring			15	
	Bringin			20	
PUTIH	Jumoyo	Misqi	10/12/2010	25	25
		Akhati Muflikah			
		Indira Dwi Ariani			
		Frida Nugraheni			
BEBENG	Kemiren	Misqi	08/12/2010	50	120
		Akhati Muflikah			
	Kamongan	Frida Nugraheni		45	
	Sudimoro	Indira Dwi Ariani		25	
BOYONG	Purwobinangun	Misqi	09/12/2010	65	90
	Candibinangun	Akhati Muflikah		11	
	Donoharjo	Indira Dwi Ariani		14	
KUNING	Hargobinangun	Misqi	11/12/2010	80	80
		Akhati Muflikah			
		Indira Dwi Ariani			
GENDOL	Kepuharjo	Misqi	13/12/2010	67	80
		Akhati Muflikah			
		Indira Dwi Ariani			
	Argomulyo	Frida Nugraheni		13	
WORO	Talun	Misqi	14/12/2010	80	100
		Akhati Muflikah			
	Kendalsari	Indira Dwi Ariani		15	
	Bawukan	Frida Nugraheni		5	
TOTAL					630

2. Dommages et gestion de crise

Étudier les lahars comme un aléa, c'est quantifier et cartographier les dégâts qu'ils ont causé, mais aussi comment les populations locales s'organisent pour limiter les risques liés à cet aléa. Les données ont été acquises de trois manières complémentaires et croisées entre elles pour faciliter le recoupement d'informations. Les dommages sont synthétisés dans l'annexe A.2.

2.1 Données statistiques communiquées par les communes touchées

La source d'information principale de l'estimation des dégâts est fournie par les mairies des communes touchées : Sindumartani, Bimomartani, Argomulyo, Yogyakarta, Sirahan, Jumoyo, Tamanagung. Toutefois, la qualité des rapports récupérés est extrêmement variable, puisqu'il n'existe pas de norme documentaire préétablie pour la caractérisation de la nature des dégâts et de leur extension. Les rapports les plus complets (Jumoyo, Sirahan) font état d'une estimation des surfaces recouvertes par les dépôts coïncidant à peu de choses près avec celles pouvant être obtenues par analyse des images satellites. En outre, ils différencient nettement les types de dégâts, notamment pour Sirahan qui a établi un classement en fonction du degré d'endommagement des habitations par *dusun* (village).

Un descriptif complet du nombre de personnes sinistrées est également inclus au rapport officiel. À Jumoyo, le rapport détaille précisément la surface en hectares des différentes cultures qui ont été ensevelies par les lahars. Dans les autres cas, l'information est beaucoup plus sommaire, la distinction se faisant seulement entre maisons entièrement détruites et maisons « endommagées ». Les rapports d'Argomulyo et de Bimomartani sont très lacunaires, et ne mentionnent pas le nombre de dégâts par village ; dans ce cas, il a fallu se rendre auprès de chaque chef de village pour récupérer les données, lorsqu'elles existaient. Enfin, certains rapports comme ceux de Bimomartani ou de Sindumartani mentionnent les dommages sur les réseaux de canalisation et d'irrigation ; si les autres documents ne les mentionnent pas, c'est par manque de données précises (Argomulyo, Sirahan, Jumoyo) ou parce que de tels dégâts n'ont pas été remarqués (Tamanagung).

Aucun rapport similaire n'a pu être récupéré à Yogyakarta pendant les études de terrain, la mairie préparant « un compte-rendu définitif » destiné aux Travaux Publics (*Pekerjaan Umum*, P.U.) pour la fin de l'été 2011 qu'il n'a pas été possible de se procurer. Les données issues des rapports publiés par les équipes partenaires de l'Université Gadjah Mada (UGM) de Yogyakarta, travaillant plus spécifiquement sur la Code, ont toutefois permis de répondre à certaines lacunes (Sri Hadmoko *et al.*, 2011).

2.2 Observation participative : la présence dans un village pendant un lahar

Il s'agit certainement du cas de figure permettant de récolter le plus d'information, mais qui demeure très difficile à mettre en œuvre compte tenu de l'aspect imprévisible du déclenchement des lahars, de leur intensité et de la vaste étendue du terrain d'étude. Il a toutefois été possible le 22 mars 2011 d'assister à l'inondation partielle des villages Panggung et Teplok (rivière Opak), permettant de calculer des débits par intervalle de 15 min sur une section fixe au niveau du pont de Panggung et de cartographier précisément les dégâts (GPS). La réaction des populations et la gestion de crise à l'échelle locale ont été analysées.

2.3 Entretiens semi-dirigés avec les personnes clés de la gestion de crise

Enfin, pour saisir la manière dont réagissent les communautés exposées face aux lahars, des entretiens semi-dirigés avec les acteurs de la gestion de crise. Les entretiens ont duré de 45 min à 1h15 (Tableau 11), et le protocole d'enquête a mis en avant :

- L'organisation de la surveillance des lahars
- Les outils de l'information et de la prévention
- Le signal d'alerte et des évacuations.

Tableau 11 - Entretiens réalisés pour définir l'organisation de la gestion de crise en cas de lahar

Groupe	Nom	Bureau ou lieu de résidence
Scientifique	Noer Cholik	BPPTK (Yogyakarta)
Administration (maires de communes)	Pak Joko Wiyarno Pak Muryono	Tamanagung Sirahan
ONG	Mas Asep Mas Heru	Pecinta Alama Jalin Merapi
Communauté d'habitants	Mas Janis	Code, Yogyakarta
Bénévoles (habitants des villages exposés)	Mas Ari Mas Darmo Mbak Yarni Mas Sihadi Pak Widiyanto	Gendol, Sindumartani, Opak, Argomulyo Kuning, Hargobinangun Boyong, Purwobinangun Putih, Sirahan

3. Les sites d'extraction : comment étudier le fonctionnement de cette activité ?

3.1 La recherche d'information : mémoires académiques et rapports officiels, examen critique des sources

3.1.1 **Une littérature scientifique quasi-inexistante**

L'absence de publications internationales ou même nationales sur les extractions de matériel volcanique au Merapi n'a pas permis de prise de contact approfondie avec le problème de l'exploitation des dépôts volcanoclastiques. Les premières informations précises sur le cas du Merapi ont été issues de mémoires universitaires rédigés par des étudiants de l'Université Gadjah Mada (UGM, Yogyakarta) et de l'Institut de Technologie de Bandung (ITB). Ces travaux concernent essentiellement des mémoires de « S1 » (*Strata* 1, diplôme de fin d'études de premier cycle) ou de « S2 » (équivalent d'un diplôme de master en Indonésie), parfois de S3 (thèse de doctorat). Chaque mémoire aborde les extractions selon un angle problématique précis (Tableau 12), mais plusieurs nuances limitent l'utilisation approfondie de certains de ces travaux. En effet, les travaux ne traitent des extractions que sur un espace restreint à ses limites administratives : aucun n'aborde sa recherche sur l'ensemble du volcan. La cause en est bureaucratique, car les permis de recherche ne sont pas valables d'une région à l'autre, et les étudiants souvent n'ont pas le temps – ni l'envie – de subir les contraintes de plusieurs demandes de permis pour travailler sur plusieurs secteurs du volcan. L'information délivrée par ces mémoires demeure donc limitée à une zone précise du Merapi, et ne rend compte que d'une vision territorialisée de l'activité, sans aperçu à l'échelle du volcan. Sudibyo (2002) produit plusieurs données précieuses pour le cadre législatif et la quantification du nombre de

camions et de travailleurs dans la région de Magelang au début des années 2000. Il n'a pas effectué de comparaison avec le versant méridional du volcan, et aucune étude n'a été trouvée sur ce sujet. Le mémoire de Priyo Hutomo (1997), consacré à l'analyse de la ressource dans la Boyong (versant sud), propose des estimations de volume de matériel volcanoclastique disponible dans le fond de vallée, évoque l'activité d'extraction en 1996 dans la Boyong, mais ne donne aucune idée de la vitesse d'exploitation dans les autres vallées du versant sud. Quant à la thèse de doctorat de Purwanto (2007), elle n'effectue pas de retour historique sur les rythmes d'exploitation sur les versants sud, et ne propose qu'une idée du nombre de travailleurs présents dans la Gendol uniquement au moment de l'enquête (2006).

Les mémoires universitaires permettent de comprendre l'ensemble des conséquences économiques et environnementales qui existent, mais demeurent spatialement restreints, et n'abordent pas l'aspect diachronique et évolutif de l'activité, pourtant essentiel pour en comprendre les enjeux autour du Merapi. Pour compléter ces informations, il a fallu rechercher des informations complémentaires auprès des administrations régionales.

Tableau 12 – Données secondaires issues des mémoires universitaires indonésiens consacrés aux extractions des dépôts volcanoclastiques du Merapi

Auteur	Type de document	Année	Sujet	Informations principales
Seijjo Hassan Abasi	Mémoire S2	1996	Forme des dépôts de lahars dans la Krasak et la Boyong, et étude hydrogéologique de la porosité des dépôts dans l'alimentation des nappes alluviales des fonds de vallée, et dans celles des aquifères de la partie distale du Merapi (centre urbain de Yogyakarta).	Impact négatif des extractions dans les fonds de vallée : perturbation du processus d'infiltration de l'eau dans les dépôts, impacts à plus petite échelle sur les aquifères.
Priyo Hutomo	Mémoire S1 UGM	1997	Estimations sur la quantité et la qualité (reposant sur des paramètres morphométriques et pétrographiques) des dépôts de lahars dans la Boyong, avec pour objectif de fournir une étude de géographie appliquée à l'ingénierie.	Utilisation des dépôts : typologie des matériaux prisés, et des matériaux délaissés. Volumes exploités dans la Boyong à la fin des années 1990. Durée de vie théorique de l'activité d'extraction (rapport volume extrait par an / volume disponible).
Joko Sudibyo	Mémoire S2 ITB	2002	Les extractions dans les vallées de la région de Magelang : historique et enjeux socio-économiques.	Historique des régulations des extractions à Magelang. Liste des acteurs publics et privés et leur rôle respectif. Estimation des rythmes de l'activité au début des années 2000 à Magelang.
Purwanto	Thèse S3 UGM	2007	Impacts écologiques dus aux extractions des dépôts de lahar dans la région de Sleman.	Explication de l'évolution de la régulation à Sleman. Présentation des sites d'extraction de la Gendol en 2006.

3.1.2 Des rapports officiels de qualité variable

Les administrations susceptibles de délivrer des données sont les bureaux de l'énergie et des mines de chaque district autour du Merapi, ainsi que le « Proyek Merapi » (bureau d'ingénierie du Merapi). Effectivement, ce sont eux qui sont théoriquement censés encadrer officiellement les extractions. C'est très certainement durant cette longue et fastidieuse collecte des données que l'on prend la mesure des contraintes qu'impose la division administrative du Merapi en deux provinces et quatre districts (voir Introduction). Chaque entité territoriale possède ses propres règles de communication des données, dont la forme n'est absolument pas harmonisée d'un district à l'autre, y compris dans une même province.

On comprend mieux à quel point la gestion d'une activité telle que les extractions, mobile par définition (circulation des camions, des travailleurs), est marquée par le manque d'unité entre ces différentes entités régionales. Le Bureau des Mines de Sleman et celui de Magelang se sont montrés prodiges en informations. En revanche, les administrations de Klaten et Boyolali ne semblaient pas s'être réellement intéressées au problème des extractions dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi, principalement parce que les lahars y sont, proportionnellement, moins fréquents à Klaten, et même quasiment absents sur les flancs oriental et septentrional du volcan (Boyolali).

Par *document officiel* est désigné tout type d'information présentée sous la forme d'un rapport dont les auteurs sont clairement identifiés, ainsi que la méthode d'obtention des données ou les sources. Il s'agit d'un outil de travail référencé dans les administrations qui les délivrent. Les données du rapport d'activité du Proyek Merapi « Yachiyo » (bureau d'ingénierie spécialisé dans l'aménagement du Merapi) obtenu à Sleman est certainement la source d'information la plus solide (Tableau 13). Rédigée en plusieurs volumes, sous la responsabilité du Professeur Darmanto de l'Université Gadjah Mada, elle s'attache à montrer l'état des lieux des extractions dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi en 2001 et en 2009. L'information disponible concerne essentiellement un historique des législations à Magelang et à Sleman, ainsi qu'une explication des différents acteurs impliqués ; elle confirme très largement ce qu'avait écrit Sudibyo dans son mémoire universitaire en 2002. Toutefois, elle n'indique pas d'estimations de tonnage ou de volumes extraits pour les différents sites d'extraction, ni de mesures d'effectifs.

Les documents inédits (Tableau 13) concernent des données présentées en vrac, sur papier libre, sans mention d'auteurs ni de sources explicites. Les bureaux de Sleman et Magelang ont délivré bon nombre d'informations sous cette forme, expliquant qu'il s'agissait de tableaux ou de documents texte présents dans leur base de données, mais qui n'avaient jamais été utilisés, ni présentés officiellement ni publiés, ne serait-ce qu'en interne. Naturellement, l'absence de précision quant à la manière dont les comptages d'effectifs et/ou de camions ont été effectués rend fort discutable la fiabilité de ces tableaux, lesquels n'indiquent pas non plus où la mesure a été faite. Cette pauvreté d'information solide montre le peu d'intérêt des administrations responsables pour les extractions de matériel volcanoclastique. Malgré tout, ces données ont été utilisées, notamment pour retracer l'évolution diachronique des extractions.

L'information issue des rapports administratifs est donc de qualité parfois discutable, et a nécessité des précisions de la part des responsables, réalisées à l'aide d'entretiens semi-directifs.

Tableau 13 - Données secondaires issues des bureaux et administrations

District	Documents demandés	Documents reçus	Informations principales
Sleman Bureau des Mines Proyek Merapi (avril 2010)	Historique des régulations	Copie de la loi n°3 / 2007 du district de Sleman concernant les activités d'extraction.	Complément aux travaux de Purwanto (2007) : évolution des régulations à Sleman.
	Rapports sur les extractions (sites, travailleurs, volumes...)	Document officiel Rapports d'activité du Proyek Merapi « Yachiyo 2001 » et « Yachiyo 2009 ». Documents inédit : . Tableaux des volumes extraits dans la vallée Gendol à Sleman de 2000 à 2008. . Recensement du nombre de camions circulant chaque jour. . Liste des permis de creuser accordés à Sleman. . Bénéfices issus des péages installés à Sleman (2003-2009).	Rythme de l'activité d'extraction à Sleman tout au long des années 2000. Rôle du gouvernement.
Magelang Bureau des Mines (avril 2010)	Historique des régulations	Ø	Ø
	Rapports sur les extractions (sites, travailleurs, volumes...)	Document officiel : Rapport officiel d'un projet de révision de la gestion des sites d'extraction de la Putih daté de 2001 (Wiswakharman, 2001). Document inédit : Tableau du nombre de camions recensés dans la Putih (Magelang) entre 2005 et 2008.	Complément aux travaux de Sudibyo (2002) : historique, régulations et estimation des rythmes de l'activité au début des années 2000 à Magelang.
Klaten Bureau des Mines (mai 2010)	Historique des régulations	Ø	Ø
	Rapports sur les extractions (sites, travailleurs, volumes...)	Ø	Ø
Boyolali Bureau des Mines (juillet 2010)	Historique des régulations	Ø	Ø
	Rapports sur les extractions (sites, travailleurs, volumes...)	Document officiel : Rapport « Sigma Tiga » sur les impacts environnementaux des extractions dans les dépôts de lahars anciens (sur les interfluves), à Cepogo, sur les flancs orientaux du volcan.	Complément aux travaux de Purwanto (2007) : types de dégradations environnementales pour le cas de Cepogo à Boyolali.

3.2 La recherche de données ciblées : les entretiens avec les acteurs

3.2.1 *Le rôle des gouvernements locaux dans l'organisation de l'activité*

Des entretiens semi-directifs avec les responsables des bureaux ont souvent accompagné la collecte des données à Magelang et à Sleman. Les fonctionnaires se sont montrés globalement coopératifs, et soucieux d'amender du mieux qu'ils pouvaient les lacunes des données officielles (Tableau 14). En revanche, les contacts avec les quelques groupes industriels se sont révélés extrêmement complexes. D'une part parce que ces quelques entreprises mentionnées dans les rapports « Yachiyo » de 2001 et 2009 du Proyek Merapi sont de Très Petites Entreprises (à moins de 20 salariés autres que les creuseurs dans les vallées qui ne sont que contractuels saisonniers ou quotidiens) qui ne possèdent pas de locaux, ou qui n'existaient plus en 2010. Aucune liste exhaustive n'est disponible dans les registres publics, ce qui rend impossible leur suivi, d'autant que leur emprise sur l'activité semble s'être amoindrie. Les interviews étaient de durée variable entre 35 min et 1h10, et ont été menées en langue indonésienne. Leur structure globale comprenait trois questions qui permettaient aux interlocuteurs de développer assez précisément leur réponse :

- Affirmeriez-vous que les extractions dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi sont une activité essentielle ? Pourquoi ?
- Comment encadrez-vous cette activité ? Qu'en est-il des extractions illégales ?
- Quels sont, pour vous, les impacts majeurs de ces activités ?

Tableau 14 – Entretiens réalisés pour comprendre le fonctionnement de l'activité d'extraction

Localisation et dates	Institution	Interlocuteur	Informations principales
Magelang Août 2008 Juin 2010	Bureau des Mines	Pak Joko Sudibyo	Évolution de l'activité d'extraction à Magelang pendant la décennie 2000. Rôle faible du gouvernement du district.
Sleman Août 2008 Avril-mai 2010	Bureau des Mines	Pak Purwanto	Appareil législatif et régulations. Fonctionnement des rétributions et des permis. Dommages environnementaux. Plaintes.
	Bureau de l'Environnement	Pak Urip Bahagia	Dommages environnementaux, tentatives de compensation et de réparations.
	Proyek Merapi	Pak Manis	Organisation et politique, le problème de l'illégalité. Travail du Proyek Merapi. Impacts des extractions sur les aménagements et infrastructures.
	Volcanic Sabo Center	Pak Sudradjat	Évolution de l'activité d'extraction à Sleman. Impacts des extractions sur les aménagements et infrastructures.
Magelang Août 2009	Magasin de vente du sable (<i>Depo pasir</i>) à Magelang	Pak Bejo	Provenance, destination et système de revente du matériel extrait.
Magelang Août 2009	<i>Depo pasir</i> à Magelang	?	Provenance, destination et système de revente du matériel extrait.
Sleman Août 2009	<i>Depo pasir</i> à Sleman	Pak Suparman	Provenance, destination et système de revente du matériel extrait.
Klaten Août 2009	Entreprise d'extraction : « Lestari »	Pak Anton	Fonctionnement de l'activité d'extraction encadrée par une entreprise privée.
Sleman Août 2009	Entreprise de transformation des matériaux volcanoclastiques (fabrication de tomates et autres ornements architecturaux)	Pak Siswanto	Provenance de la matière première, techniques de transformations, réseaux de ventes nationaux et internationaux. Prix de revient de l'activité, rémunération des ouvriers et organisation de l'entreprise.
Paris Novembre 2010	Architecte	Pak Eko Prawoto	Utilisation des matériaux volcanoclastiques dans le bâtiment (blocs, mais surtout béton produit à partir des sables).
Magelang Mai 2011	Atelier de sculpture « Sanggar Kendali Sodo »	Pak Suyatno	Utilisation des blocs pour l'artisanat. Production de sculptures religieuses (hindouistes, bouddhistes, chrétiennes) et profanes pour alimenter le marché de souvenirs destiné aux souvenirs (temples de Borobudur et Prambanan, ville de Yogyakarta). Techniques de travail et réseaux de vente.
Sleman Février 2011	Tenancier de warung	Mbak Yarni Mas Sihadi	Fonctionnement de l'activité d'extraction
Magelang Février 2011	Tenancier de warung	Bu Lurah	Fonctionnement de l'activité d'extraction
Sleman Février 2011	Coordinateur de site d'extraction	Mas Ari	Fonctionnement de l'activité d'extraction
Magelang Février 2011	Coordinateur de site d'extraction	Pak Joko	Fonctionnement de l'activité d'extraction

3.2.2 Fonctionnement d'un site d'extraction et organisation de la production

Pour comprendre le fonctionnement des sites d'extraction, les enquêtes ont eu lieu sur place, auprès des travailleurs eux-mêmes, mais aussi auprès de tous ceux dont l'activité est liée aux extractions, notamment les tenanciers des *warung* (restaurants et boutiques) situés à côté des carrières. Ces derniers sont des observateurs privilégiés de l'ensemble de l'activité, et interviennent parfois directement : ils peuvent percevoir les taxes de passage demandées par les villages adjacents, et, après l'éruption de 2010, lancer l'alerte en cas de lahar. Enfin, des acteurs intervenant en aval des extractions ont été rencontrés : des coordinateurs de sites d'extraction lorsqu'il y en avait (dans la Krasak ou dans la Gendol uniquement⁴), des responsables de la vente des matériaux (dans les *depo pasir*), d'entreprises de transformation de la matière première pour la fabrication de sculptures ou de matériaux de construction (béton, dalles...), ainsi qu'un architecte qui utilise fréquemment les sables du Merapi. Les entretiens ont pris plusieurs formes : sur les sites d'extraction, les séances ont été réparties en plusieurs discussions de quelques dizaines de minutes sur plusieurs jours au fur et à mesure que progressaient les travaux de terrain. En revanche, pour les responsables des magasins de revente, d'entreprises de transformation et pour l'architecte, les entretiens ont duré au moins 1 h, sous la forme d'une discussion unique et semi-dirigée. Le Tableau 14 regroupe l'ensemble des personnes rencontrées et des informations qu'elles ont partagé.

3.2.3 Caler la chronologie : constitution d'une revue de presse

Enfin, pour établir une chronologie plus claire des évolutions de l'activité d'extraction dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi, une revue de presse été élaborée à partir de plusieurs quotidiens indonésiens. L'aide du bureau de volcanologie de Yogyakarta (BPPTK) s'est révélée déterminante : les archives comportent des coupures de journaux relatant l'ensemble des informations liées au Merapi depuis 1985. Outre l'événementiel précis des différentes éruptions, des articles consacrés aux évolutions de la régulation des extractions, ou aux risques auxquels s'exposent les travailleurs sont fréquents, et permettent de bien saisir les grandes étapes de l'activité sur plus de vingt ans. La liste des 250 articles sélectionnés pour cette revue de presse figure en annexe A.3, avec les coupures de presse relatant l'événementiel des lahars de 2010-2011.

3.3 Production de données qualitatives et quantitatives : observation et mesures de fréquentation

3.3.1 Exploitation des données secondaires pour la période 1990-2010

Les rapports fournis par les administrations Magelang et Sleman et certains mémoires universitaires présentent des estimations du nombre de camions circulant pendant une journée sur un site donné ou, plus fréquemment, sur l'ensemble d'une vallée. En connaissant la capacité des véhicules, il est possible de calculer le tonnage ou le volume de matériel extrait chaque jour, et d'ensuite l'extrapoler pour une année. On peut donc (1) comparer entre eux les sites d'extraction pour voir lesquels sont les plus exploités, (2) ajouter à cette variabilité spatiale la variabilité temporelle pour comprendre comment a évolué la répartition et la production des sites d'extraction autour du Merapi. Cette temporalité est essentielle pour pouvoir cerner les zones du volcan où l'exposition des travailleurs et les enjeux sont élevés, et donc où les risques peuvent être potentiellement élevés.

⁴ Dans les autres cas, ce sont les tenanciers de *warung* qui sont responsables de la coordination du site d'extraction sur lequel ils se trouvent.

Les données secondaires peuvent être divisées en trois blocs chronologiques (Tableau 15) : un premier bloc pour la fin des années 1990 et le début des années 2000, un second pour la période 2004-2007, et un troisième pour les années 2008 à 2010 (Tableau 15). Aucune donnée antérieure n'a pu être retrouvée. Pour construire les tableaux de cubages au cours du temps pour l'ensemble du Merapi, il a fallu compiler les données des différentes sources pour reconstituer les flux quotidiens de camions depuis le début des années 2000, ce qui s'est avéré parfois assez difficile puisque chaque auteur ou institution a développé sa propre méthode de mesure. Sudibyo compte lui-même les passages de véhicules par tranche horaire à l'entrée du site de Jurangjero (Putih). Les chiffres de Siswanto (2001) sont légèrement différents car ils prennent en compte les recettes officielles des différents péages qui étaient situés sur toute la vallée Putih. Le rapport officiel du Bureau des Mines de Magelang (2001) donne également des estimations de fréquentation pour les autres vallées de Magelang au début des années 2000, qui n'ont pas pu être obtenues pour la période postérieure à 2003. Les lacunes dans le tableau peuvent être liées à la disparition momentanée de l'exploitation dans une vallée (voir chap. 6). Enfin, le BPPTK a fourni quelques données issues d'observations réalisées dans le cadre de leurs missions en 2010 sur la partie proximale de la vallée Apu.

Tableau 15 – Résumé des données secondaires utilisées pour reconstituer l'activité d'extraction des dépôts volcanoclastiques au Merapi des années 1990 à 2010

Fin des années 1990 et début des années 2000	2004-2007	2008-2010
Mémoire S.H. Abasi Mémoire P. Hutomo Mémoire J. Sudibyo Données Proyek Merapi Données Bureau des Mines Magelang	Données Bureau des Mines Magelang Données Bureau des Mines Sleman	Données Bureau des Mines Magelang Données Bureau des Mines Sleman Données Proyek Merapi Données BPPTK

3.3.2 Estimer les volumes extraits

Le nombre de camions dans les vallées du Merapi pour la troisième période 2008-2010 a pu être directement estimé sur le terrain. Les camions sont comptés lors de leur passage au péage de sortie des sites (Jambu-Kaliadem dans la Gendol, Jurangjero dans la Putih) ou au débouché de la voie d'accès principale (autres sites). La fréquentation de l'ensemble des sites d'extraction du Merapi a été évaluée d'avril à juillet 2010, à raison de 4 comptages par site. En 2011, le comptage n'a pas pu être réalisé de la même manière compte tenu d'un plus grand nombre de sites d'enquêtes ; les chiffres estimés lors des enquêtes par questionnaires (cf. *infra*) ont été utilisés. On peut les considérer comme représentatifs dans la mesure où ces enquêtes ont été faites en semaine.

D'après les observations de terrain, il apparaît que les bennes des camions sont toujours entièrement remplies. La capacité maximale des camions a donc été considérée comme le volume transporté par chaque véhicule. À partir des volumes quotidiens établis pour chaque site, le volume annuel peut être déduit en les multipliant par 350. Ce chiffre a été utilisé en accord avec les responsables des administrations locales qui, lors des entretiens, ont insisté sur le poids du calendrier religieux. Pendant le mois de Ramadhan, les extractions n'ont souvent lieu que tôt le matin, puis les sites sont vite abandonnés. En outre, durant la semaine de vacances qui suit la fin du jeûne, rares sont ceux qui viennent creuser. De fait, il semble cohérent de considérer que l'activité d'extraction est quasi-nulle au moins 2 semaines par an.

Au final, un tableau a pu être construit, recensant, pour chaque site, les évolutions des volumes extraits par jour et par an, lorsque le nombre de camions, estimé d'après les données secondaires ou les mesures de terrain, était connu (Annexes E.1 et E.2).

4. Obtenir une information quantifiée sur les travailleurs des sites d'extraction : questionnaires systématiques

4.1 Un premier questionnaire en 2009 : caractéristiques socioéconomiques des travailleurs à Jambu-Kaliadem

4.1.1 Objectifs

Au tout début du travail de thèse, un premier questionnaire systématique exploratoire a été mené sur le principal site d'extraction, Jambu-Kaliadem, situé en amont de la vallée Gendol, sur le versant sud du volcan (Figure 26), qui avait été touché par l'éruption de 2006 et les quelques lahars qui avaient suivi. L'objectif était de produire une information quantifiée précise sur :

- Les caractéristiques sociales et économiques des travailleurs (genre, âge, niveau d'étude, revenus)
- Leur provenance
- Leurs méthodes de travail.

4.1.2 Protocole d'enquête et d'analyse

Le questionnaire s'est déroulé sur une journée, en la présence d'un interprète qui a permis d'une part de poser les questions avec les termes adéquats, et d'autre part de respecter quelques règles de présentation et de conversation javanaises, nécessaires pour que les répondants puissent se sentir à l'aise. Le questionnaire comprenait dix questions fermées (annexe D.2).

Il n'y a pas eu de stratégie d'échantillonnage *a priori*, puisque la population enquêtée restait assez largement inconnue. Les répondants n'ont donc pas été sélectionnés, mais choisis aléatoirement au gré des rencontres sur le site. Dans la quasi-totalité des cas, il s'est avéré que les personnes travaillaient en équipes de quatre ou cinq ; en fonction des disponibilités de chacun, tous les membres ou partie de ces groupes ont répondu individuellement au questionnaire. Au total, 30 équipes ont été rencontrées. L'effectif total de l'échantillon représente 95 personnes, soit moins de 10% du nombre moyen de travailleurs habituellement présent à Jambu-Kaliadem.

Le traitement du questionnaire a été fort simple, puisqu'il ne s'agissait que d'une prise de contact en vue d'une enquête de plus grande ampleur. Les données ont été analysées à l'aide de statistiques descriptives univariées (moyenne des âges, études des fréquences). Cette première approche des travailleurs a permis de comprendre les principaux aspects structurels de cette activité, et de mieux saisir le fonctionnement du plus grand site d'extraction

4.2 Un second questionnaire après l'éruption de 2010

4.2.1 Objectifs

Prévu en 2011 sur un échantillon plus vaste et sur plusieurs sites d'extraction, le second questionnaire devait reprendre quelques éléments de l'enquête exploratoire, et les prolonger par d'autres aspects suite à l'observation systématique réalisée pendant les travaux de terrain de 2010. L'éruption survenue en octobre-novembre 2010 a considérablement amplifié le travail à réaliser puisque les extractions, désormais, se pratiquent dans la quasi-totalité des vallées et des rivières du volcan. En outre, des questions ont été ajoutées pour pouvoir saisir ce qui a pu changer à cause de l'éruption (ancienneté du travailleur, salaire, méthode de travail, encadrement et législation). Les

trente-cinq questions, regroupées en six thèmes (données personnelles du répondant, caractéristiques socioéconomiques du répondant, connaissance des aléas et perception des risques encourus, connaissance de la réglementation en vigueur, santé et conditions de travail, connaissance des réseaux et ventes des matériaux recherchés), donnent une information quantifiée sur les travailleurs et permettent de dresser un bilan des conséquences de l'éruption sur l'organisation d'une activité informelle mais très importante autour du Merapi (cf annexe D.3).

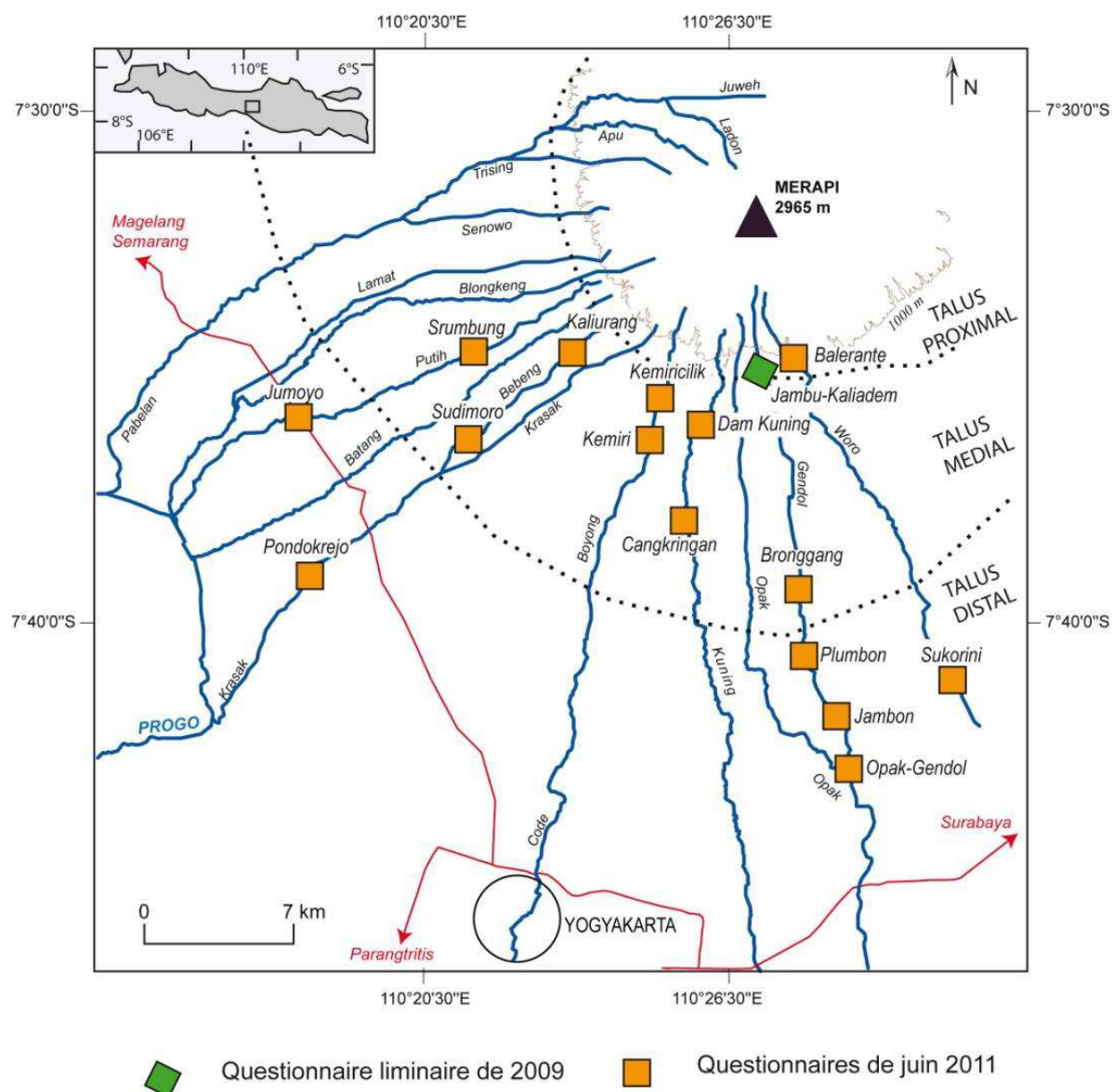


Figure 26 - Les questionnaires systématiques réalisés auprès des travailleurs dans les sites d'extraction

4.2.2 Protocole d'enquête et d'analyse

Les questionnaires ont eu lieu durant la dernière semaine de juin dans sept rivières du Merapi : Putih, Bebung, Krasak, Boyong, Kuning, Gendol, Woro (Figure 26). Elles ont été choisies, au terme de plusieurs semaines d'observation continue, selon deux critères principaux : (1) elles ont été traversées par des coulées volcanoclastiques dont les dépôts peuvent être exploités, et (2) des sites d'extraction permanents et suffisamment fréquentés (activité quotidienne avec un nombre > 30 travailleurs par jour) s'y sont développés. Les vallées sur lesquelles les sites d'extraction demeurent trop ponctuels et trop peu fréquentés (Senowo, Trising, Pabelan, Lamat, Blongkeng, Opak) n'ont pas

été retenues. Dans chacune des vallées sélectionnées, l'ensemble des sites régulièrement et suffisamment fréquentés (ouverture quotidienne avec plus de 30 travailleurs par jour) ont été choisis. Au total, 15 lieux d'enquête ont été identifiés, correspondant tous aux sites d'extractions les plus fréquentés du Merapi. Comme pour l'enquête de perception de 2010, des étudiants en géographie indonésiens javanais ont été recrutés pour effectuer les questionnaires. Outre la nécessité de mener des entretiens à la fois en indonésien et en javanais, cette campagne de questionnaire avait lieu à peine six mois après la fin de l'éruption, sur des espaces qui avaient été très durement frappés par les impacts des coulées et déferlantes pyroclastiques. La recherche des données concernant les dommages dans certains villages (cf. *supra*) avait été parfois rendue difficile par des interlocuteurs désireux de dramatiser leur situation dans l'espoir que l'étranger qu'ils avaient en face d'eux puisse les aider financièrement. Pour limiter ces interférences et garantir une objectivité maximale, le choix d'enquêteurs javanais s'imposait.

Les enquêteurs avaient chacun à charge trois sites d'enquête, sur lequel ils avaient obligation de rester de 8h à 17h. Le texte du questionnaire, traduit en indonésien, a été imprimé sous la forme d'un tableau que les enquêteurs devaient remplir (Annexe D.4). Pour chaque site, les enquêteurs devaient en outre compléter une fiche résumant le nombre de camions et de travailleurs présent à différents moments de la journée ainsi que le nombre de personnes interrogées. Le Tableau 16 résume, pour chaque vallée, le nombre de sites d'enquête, le nom de l'enquêteur ainsi que la date. Le nombre de personnes interrogées est également mentionné. L'effectif total est de 733 répondants. Les enquêteurs avaient pour consigne d'interroger au minimum 20 personnes par site pour une journée d'enquête. Les effectifs les plus élevés correspondent aux sites qui sont le plus fréquentés. Près d'un tiers des personnes rencontrées travaillent dans la Gendol, où quatre sites d'extraction ont été identifiés. Un autre tiers des travailleurs interrogés se trouve dans la Putih et la Bebeng, et le dernier tiers le long des rivières Kuning, Krasak, Boyong. Dans le cas de sites peu fréquentés, la totalité des travailleurs présents ont été interrogés (confluent Opak-Gendol). Le traitement initial du questionnaire a été réalisé à l'aide de statistiques descriptives univariées pour apporter une information quantitative complète et représentative sur l'état des lieux des extractions dans les vallées et les rivières du Merapi après l'éruption de 2010.

Tableau 16 - Le questionnaire de 2011 sur l'activité d'extraction des dépôts volcanoclastiques : sites, enquêteurs et effectifs de répondants

VALLEE	SITE	ENQUETEUR	JOUR D'ENQUETE	NOMBRE DE PERSONNES INTERROGÉES	
				SITE	VALLEE
PUTIH	Ngepos	Manda	29/06/2011	44	84
	Jumoyo	Dimas	25/06/2011	40	
BEBENG	Kaliurang	Hendra	27/06/2011	65	135
	Sudimoro	Qodhan	28/06/2011	70	
KRASAK	Pondokrejo	Bayu	29/06/2011	53	53
BOYONG	Kemiricilik	Dimas	27/06/2011	38	76
	Kemiri	Manda	27/06/2011	38	
KUNING	Dam Kuning	Manda	22/06/2011	29	54
	Cangkringan	Qodhan	25/06/2011	25	
GENDOL	Bronggang	Bayu	25/06/2011	70	230
	Plumbon	Dimas	28/06/2011	72	
	Jambon	Hendra	23/06/2011	48	
	Gendol-Opak	Hendra	22/06/2011	40	
WORO	Dam Balerante	Qodhan	23/06/2011	75	101
	Sukorini	Bayu	21/06/2011	26	

5. De l'aléa à la ressource : comment élaborer une étude de risque dans les sites d'extraction ?

Une fois que l'analyse statistique univariée des données du questionnaire de 2011 a dégagé les grandes tendances existant dans les sites d'extraction, les résultats sont prolongés par la quantification des facteurs du risque sur chaque site d'enquête, à l'aide d'un indice composite élaboré à partir de seuils issus du questionnaire. Le risque est défini comme une mesure du danger ayant la dimension d'une espérance mathématique.

Sur un espace donné, trois facteurs de risque sont habituellement utilisés : la vulnérabilité V , les enjeux E , et la probabilité A que survienne un aléa. La valeur d'un risque R sur cet espace est donc $R = V \times E \times A$. L'objectif est donc, sur les espaces particuliers que constituent les sites d'extraction, de mesurer la valeur du risque existant compte tenu d'une récurrence de l'aléa lahar augmentée après l'éruption du Merapi. Aucune étude des risques n'a été réalisée pour les sites d'extraction, qui, en dépit de leur importance, ne sont absolument pas mentionnés dans les cartes de risque. Pourtant, des centaines, voire plus de mille travailleurs s'y rendent chaque jour ; des incidents y sont déjà survenus (camions emportés, notamment). La méthode proposée ici s'attache à analyser séparément chaque facteur de risque, en lui donnant une valeur quantifiée pouvant être ensuite combinée aux autres facteurs. Le classement du risque produit pour chaque site d'extraction permettra de :

- Localiser les sites les plus dangereux
- Comprendre pourquoi le risque y est élevé, en fonction de la valeur de chaque facteur.

5.1 La vulnérabilité

Dans le cas des sites d'extraction, où les travailleurs n'habitent pas, les infrastructures demeurent rares, pour ne pas dire absentes. La vulnérabilité se focalise donc essentiellement sur les travailleurs, et est directement établie d'après les réponses au questionnaire, mais également d'après les observations de terrain réalisées depuis 2008. La question fondamentale revient à se demander ce qui fait qu'un travailleur est vulnérable. Les études de vulnérabilité réalisées auprès des communautés rurales ou urbaines s'intéressent principalement à la manière dont vivent les individus, comment ils s'approprient – ou au contraire ne s'approprient pas – leur territoire, et quelles sont les ressources qui leur permettent de pouvoir résister aux ruptures parfois brusques que peuvent induire des aléas (cf. chap 1). Là encore, comme les travailleurs ne vivent pas dans les sites d'extraction, qui ne sont que des lieux d'exploitation et non pas le territoire quotidien et le support vital d'une communauté, la vulnérabilité sera plutôt à rechercher dans les pratiques et méthodes de travail des individus. Il conviendra alors d'adapter ce concept de vulnérabilité et de définir ce qui met en danger les travailleurs sur ce site d'espace précis que sont les sites d'extraction : connaissances fondamentales des aléas et notamment des lahars, présence ou non d'un système d'alerte, respect ou non de ce système d'alerte, prise de risque volontaire (refus d'évacuer, par exemple), présence ou absence de structures encadrantes, illégalité... (Figure 27).

Une fois que les différents indices de vulnérabilité auront été identifiés, un coefficient leur sera attribué en fonction de leur importance relative : certains, en effet, semblent plus déterminants que d'autres. La prise de risque, par exemple, joue plus que l'absence de structures encadrantes. La mise en œuvre d'une telle hiérarchie est bien entendu empirique et peut-être subjective, mais ce choix scientifique est entièrement assumé car il n'est pas apparu pertinent de donner le même poids à tous les indices de vulnérabilité. Ceux-ci seront présentés et argumentés le plus finement possible, et permettront d'obtenir, pour chaque site, une valeur de vulnérabilité chiffrée de 0 à 100. De la même manière qu'il existe des échelles de vulnérabilité du bâti, une échelle de vulnérabilité des travailleurs a été développée, sur la base de plusieurs critères. La simplification qui en résulte est inévitable, mais a le mérite d'apporter une réponse quantifiée au problème de la vulnérabilité.

5.2 Les enjeux

Les enjeux, pour chaque site, sont évalués également en vue de fournir un facteur numérique évalué sur une échelle allant des enjeux réduits aux enjeux élevés. Il s'agit de recenser l'ensemble des éléments susceptibles d'être détruits lors d'un lahar, représentant un coût matériel et financier (Figure 27), sans oublier la fréquentation humaine. Tout comme pour le calcul de vulnérabilité, une échelle a été élaborée pour définir une valeur chiffrée des enjeux propre à chaque site. Les éléments pris en compte correspondent au nombre de véhicules, à l'utilisation ou non d'engins d'extraction (pelleteuses), ainsi qu'à la présence de *warung* (restaurants et petits magasins informels).

5.3 Les aléas

Dans le calcul du risque, seule la fréquence d'occurrence de l'aléa lahar pour chaque rivière a été retenue. L'absence d'information systématique des débits empêche de discriminer les rivières en fonction de l'intensité des lahars qui y sont survenus. En outre, il n'est pas possible de savoir combien de fois les sites d'extraction situés les plus en aval ont été touchés par des lahars. Il a donc été décidé de ne pas intégrer une inexistante valeur d'intensité de l'aléa. D'ailleurs, lorsque survient un lahar, quelque soit sa nature et son intensité, il représente une menace systématiquement mortelle pour les éventuels travailleurs qui se seraient attardés dans le corridor de lahar.

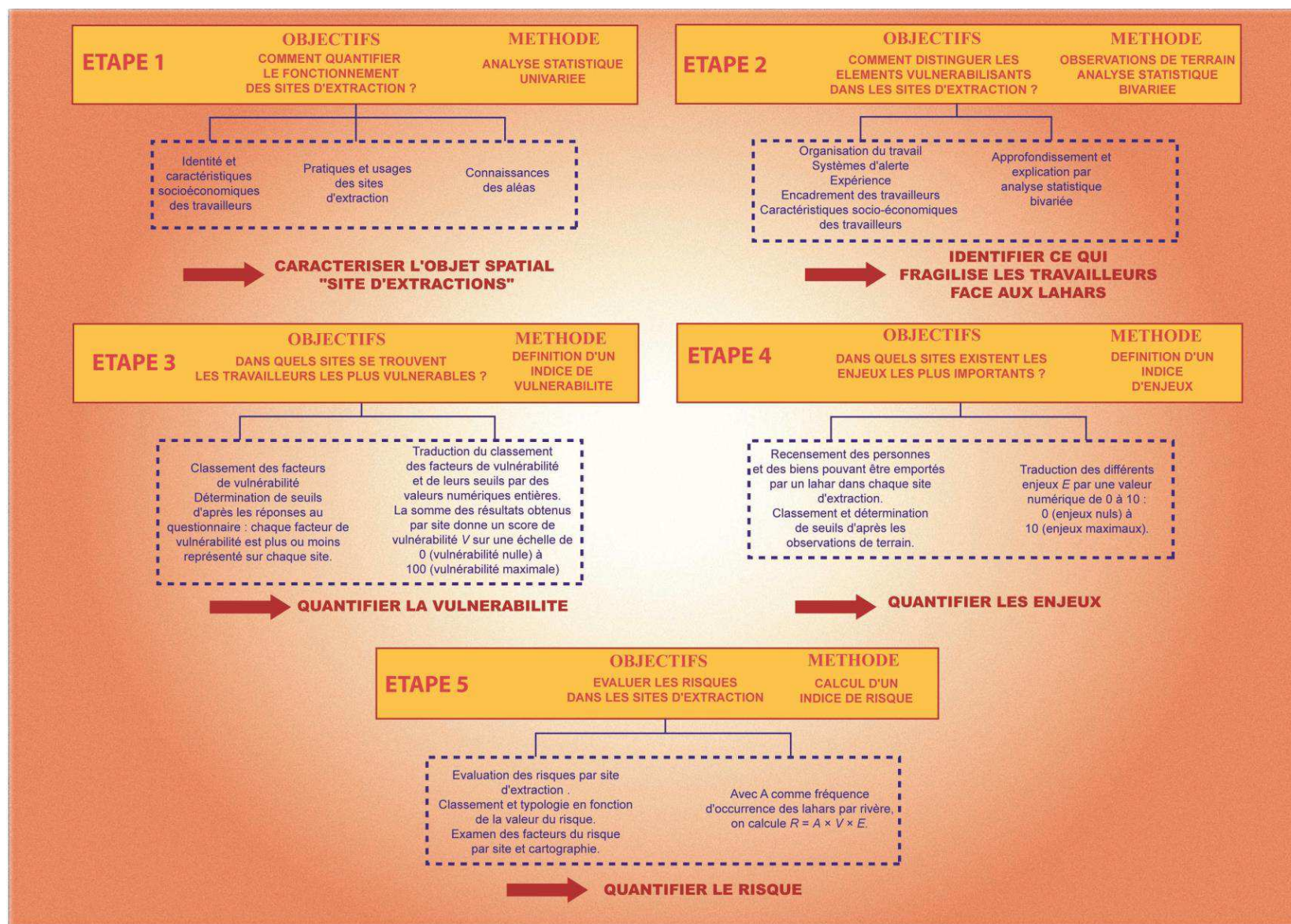


Figure 27 - Étapes de l'étude des risques à l'échelle locale pour un type d'espace particulier, les sites d'extraction du Merapi

Tableau 17 - Synthèse : données obtenues, méthodes et résultats

Type de données	Méthode d'acquisition	Information obtenue	Résultats exposés aux...
Données primaires	<i>Imagerie satellite et photos aériennes</i>	Evolution de la forme des rivières à échelle locale. Cartographie des dépôts. Cartographie des dommages. Etude d'un site d'extraction.	Chap. 3, 4, 5, 6 & 7
	<i>Mesures topographiques</i>	Evolution de la forme des rivières à échelle locale. Aspects planimétriques des dépôts. Éléments de dynamique des lahars (avec support vidéo ponctuel).	Chap. 3, 5 & 6
	<i>Sédimentologie</i>	Lithofaciès des dépôts. Granulométrie des sables.	Chap. 5
	<i>Questionnaires</i>	Perception de l'aléa Fonctionnement d'un site d'extraction (2009) Aspects socio-économiques des extractions (2011)	Chap. 4, 6 & 7
	<i>Entretiens</i>	Gestion de crise. Aspects socioéconomiques et historique des extractions.	Chap. 4, 6 & 7
Données secondaires	<i>Rapports statistiques</i>	Dégâts liés aux lahars.	Chap. 4, 6 & 7
	<i>Études et mémoires</i>	Fonctionnement et historique des extractions.	Chap. 6 & 7
	<i>Documents officiels</i>	Reconstitution des volumes extraits dans les dépôts. Aspects législatifs et socioéconomiques et historique des extractions.	Chap. 4, 6 & 7

L'étude intégrée des lahars en tant qu'aléas et vecteurs de ressource qui représente l'objet de cette thèse s'appuie sur un protocole méthodologique alliant plusieurs techniques d'analyse et d'enquêtes (Tableau 17, Figure 28) :

- Des investigations géomorphologiques : suivi de la forme des rivières (photo-interprétation et topographie au télémètre laser) et analyse sédimentologique des dépôts.
- Des entretiens semi-dirigés : responsables administratifs des communes et des bureaux des différents districts du Merapi.
- Des questionnaires systématiques : perception de l'aléa lahar et étude du fonctionnement des sites d'extraction, définis comme des objets géographiques nécessaires à la géographie des risques du Merapi.
- Recherche et exploitation de données secondaires : statistiques officielles, rapports d'étude et mémoires universitaires.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les deux parties suivantes (Tableau 17). Ils apportent un éclairage sur l'aléa lahar après l'éruption de 2010 et en quoi il représente un risque majeur au Merapi, ainsi qu'une vue d'ensemble du fonctionnement des sites d'extraction dans les dépôts volcanoclastiques, de leur évolution, et des risques existant dans les différents sites étudiés.

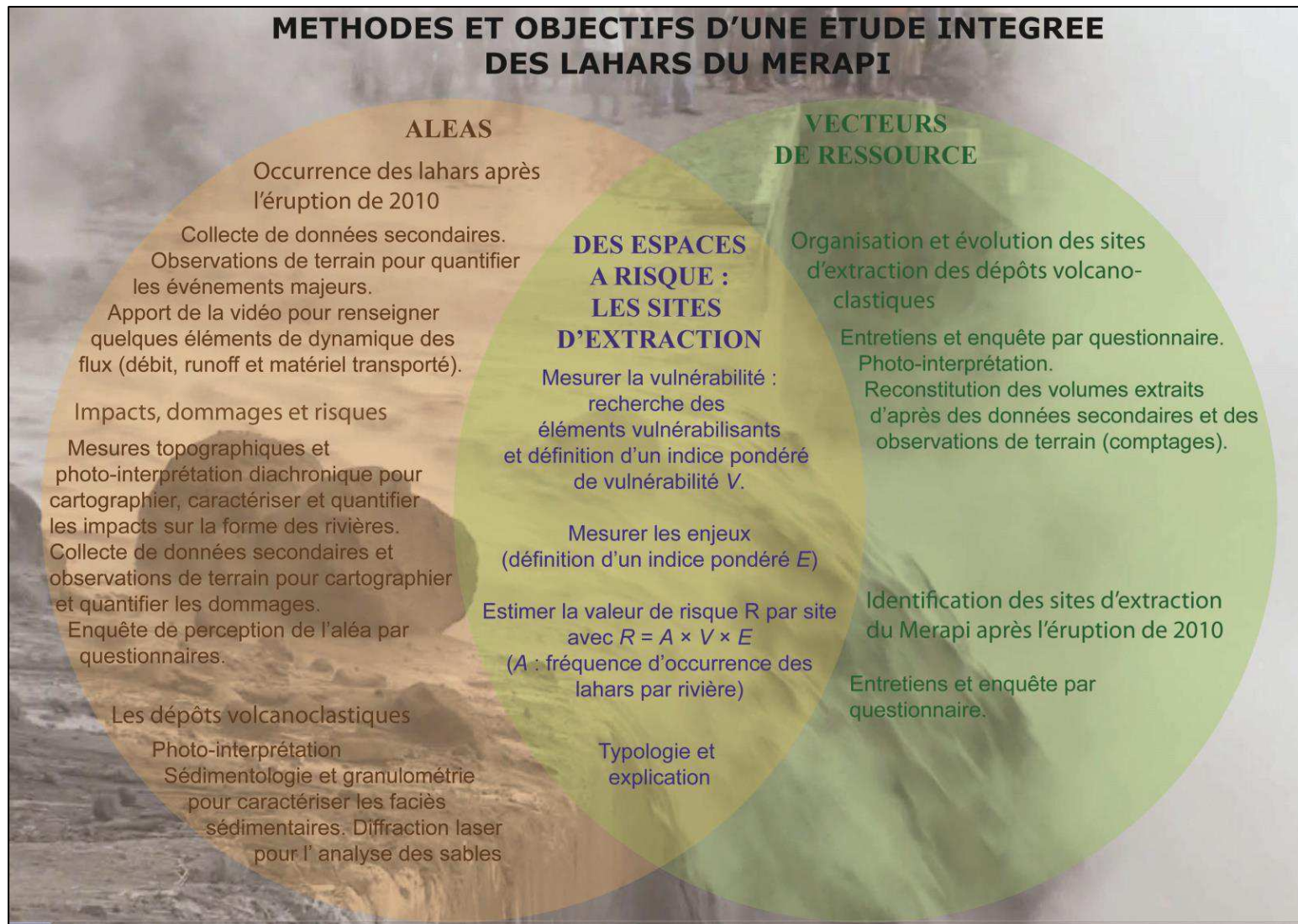


Figure 28 - Résumé du protocole méthodologique de la thèse

DEUXIÈME PARTIE

Les impacts des lahars après l'éruption de 2010



Un atelier de sculpture enseveli par un lahar de la Pabelan, à l'ouest du Merapi (Tamanagung)

Chapitre 3 – Les lahars du Merapi après l'éruption de 2010 : fréquence, répartition spatiale, chronologie et dynamiques morphogènes

« Je ne reconnais plus la rivière Opak ; le petit flot tranquille qu'elle était est devenu un monstre énorme dont les vomissures ont tout emporté, ont tout dégradé. Nous sommes loin du cratère, mais tout a changé depuis l'éruption. Je ne reconnais plus ce village où je suis né » (Darmo, Panggung, mars 2011).

Les occurrences répétées de lahars sur un édifice volcanique provoquent le transfert massif et rapide des dépôts pyroclastiques vers le talus distal du volcan. En réponse à la double dynamique d'érosion et de sédimentation ainsi provoquée par les lahars, la forme des réseaux hydrographiques et des interfluves sur le talus distal du volcan subit des modifications importantes. L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats renseignant :

- (1) L'événementiel des lahars qui ont suivi l'éruption de 2010, en insistant particulièrement sur leur répartition spatiale, leur fréquence d'occurrence, et en présentant de manière plus détaillée les événements d'intensité élevée. Les mesures de débit et de volume réalisées de manière instantanée sont présentées à titre indicatif pour illustrer l'intensité des écoulements, mais n'autorisent pas de traitement approfondi de la dynamique des lahars, qui n'entre pas dans le cadre de ce travail.
- (2) Les réponses morphologiques du réseau hydrographique à l'occurrence des lahars. Plusieurs exemples à échelle locale permettront de définir les différents aspects morphogènes des lahars (défluviations, élargissements de chenaux, débordements) qui contribuent à la formation de larges corridors de lahars sur le talus distal du Merapi.

I. LES OCCURRENCES DE LAHARS APRÈS L'ÉRUPTION DE 2010

1. Un aléa fréquent

La base de données « lahars » (cf. chap. 2 et Annexe A.1) a recensé les occurrences de lahars survenus pendant la période du 27 octobre 2010 jusqu'au 25 janvier 2012.

1.1 Un aléa syn- et post-éruptif

Les premiers lahars ont eu lieu pendant l'éruption du volcan Merapi 2010. Entre le 27 octobre et le 3 décembre 2010, date à laquelle le niveau d'alerte maximal a été abaissé, 45 événements ont été identifiés et peuvent être considérés comme lahars synéruptifs. Ils ont été déclenchés par la remobilisation quasi-instantanée des dépôts pyroclastiques pendant les averses du début de mousson (> 1500 mm de précipitations cumulées par mois).

Pendant la saison des pluies 2010-2011 et au début de celle de 2011-2012, 282 lahars ont eu lieu, soit plus de 4 par semaine en moyenne, voire près de 6 si l'on retire les 25 semaines de saison sèche survenue entre mai et septembre 2011. Ainsi, dans la rivière Putih, 55 événements se sont produits en un peu plus d'un an (Figure 29), ce qui revient à une récurrence d'environ un lahar par semaine. Les rivières du flanc sud comme la Boyong ou la Gendol ont également connu de très nombreuses occurrences de lahars (> 20 événements). La moitié des rivières ont connu plus de 10 lahars (Figure 29) d'octobre 2010 à janvier 2012.

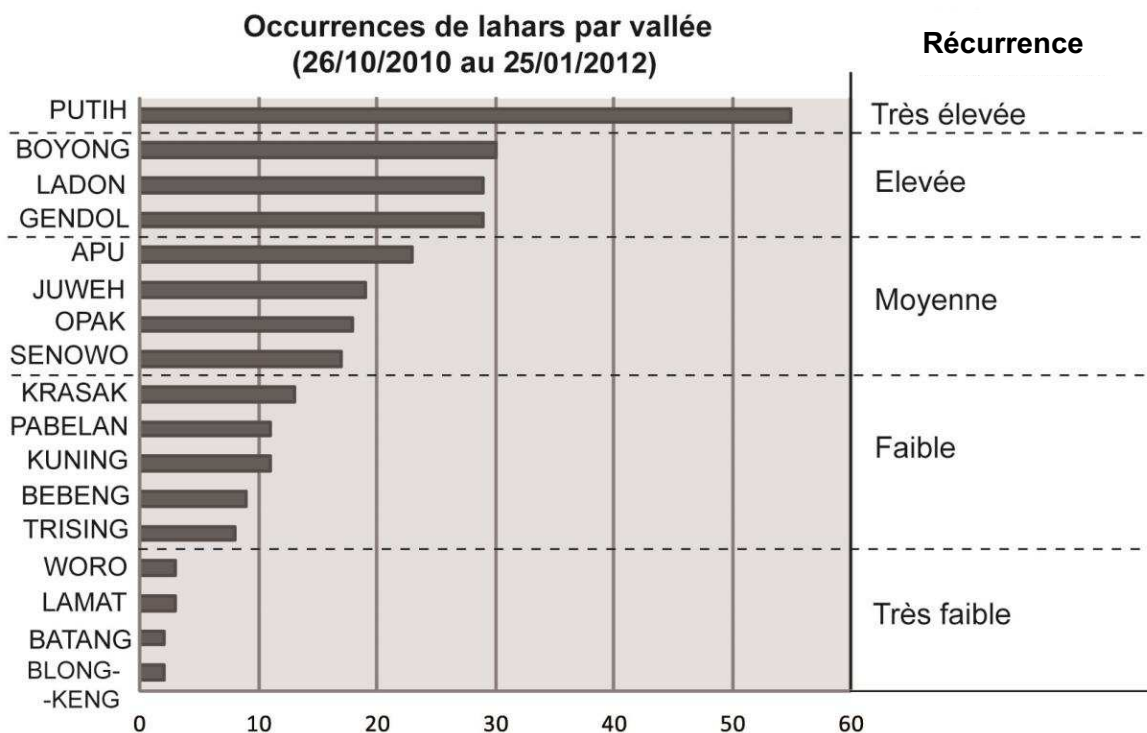


Figure 29 - Nombre de lahars par rivière (2010-2012)

1.2 Une vaste distribution spatiale

À cette récurrence élevée s'ajoute la distribution géographique des bassins-versants dans lesquels se sont déclenchés des lahars, ceux-ci survenant dans l'ensemble des rivières radiales des flancs occidentaux et méridionaux du volcan. Au cours du XX^e siècle, les lahars se produisaient habituellement dans une ou deux rivières, en fonction de la localisation plus restreinte des dépôts de coulées à blocs et à cendres d'effondrement de dôme sur un ou deux bassins-versants (Voight *et al.*, 2000 ; Lavigne *et al.*, 2000a). Après l'éruption de 2010, les lahars sont désormais susceptibles de se déclencher dans n'importe quelle vallée de l'ouest ou du sud du Merapi, parfois de manière simultanée. Le 9 janvier et le 4 mars 2011, des lahars ont ainsi eu lieu dans 11 rivières à la fois, en fin d'après-midi. Une telle situation de démultiplication spatiale des occurrences de lahars s'est peu rencontrée pendant le XX^e siècle au Merapi.

Tableau 18 - Répartition spatiale, occurrences et fréquences historiques des lahars au Merapi
(données historiques : d'après Voight *et al.*, 2000 et Lavigne *et al.*, 2000)

	Bassin versant des fleuves	Bassin versants des tributaires issus du Merapi	Rivière	Nombre de lahars en 2010-2012	Fréquence (%)	Flanc du volcan
Sous le cône actif	PROGO	PABELAN	Ladon	29	10,3	Nord-ouest
			Juwah	19	6,7	
			Apu	23	8,2	
			Trising	8	2,8	Ouest
			Senowo	17	6	
			Pabelan	11	3,9	
		PUTIH	Lamat	3	1,1	
			Blongkeng	2	0,7	
			Putih	55	19,5	
		BATANG	Batang	2	0,7	
		KRASAK	Bebeng	9	3,2	Sud-ouest
			Krasak	13	4,6	
	OPAK	BOYONG-CODE	Boyong	30	10,6	Sud
		KUNING	Kuning	11	3,9	
		OPAK	Opak	18	6,4	
			Gendol	29	10,3	Sud-est
	SOLO	WORD	Woro	3	1,1	
			Rivières du flanc est (Graweh, Glihan...)	0	0	Est

Si les bassins-versants des deux fleuves Progo et Opak n'ont pas été affectés de la même manière par les lahars du Merapi, d'importantes fréquences ont été comptées dans chacun d'eux. Plus des trois-quarts des lahars se sont produit dans seulement trois bassins-versants de tributaires de ces deux fleuves, localisés respectivement au nord-ouest, à l'ouest et au sud : 37,9% dans le bassin versant de la Pabelan, 20,9% dans celui de la Putih et 16,7% dans celui de la Opak. Dans le cas du bassin versant de la Pabelan, la présence de cinq affluents fréquemment empruntés par des lahars favorise l'occurrence de flux volumineux en aval si plusieurs écoulements simultanés viennent à se rencontrer. Un seul événement de cette ampleur a été relevé le 30 mars 2011 (voir *infra* I. 2.3.3 et II. 3.1) pour un

total de 106 occurrences dans cette unité hydrographique. Les rivières du flanc est, qui incisent les dépôts des éruptions anciennes formant l'édifice du Merapi ancien, n'ont pas subi de lahars après l'éruption de 2010 (Tableau 18). Le réseau hydrographique oriental n'est en effet pas relié au cône actif du volcan, dont il est séparé par la surface subhorizontale d'un ancien cratère, Pasar Bubar (Newhall *et al.*, 2000 ; Voight *et al.*, 2000 ; Andreastuti *et al.*, 2000). Cette déconnexion structurale entre le cône actif du Merapi et le tablier volcanoclastique oriental empêche le déclenchement de lahars dans les bassins-versants de l'est du volcan.

1.3 La saison des pluies 2010-2011 : une situation de Niña propice au déclenchement de nombreux lahars ?

Les fréquences les plus élevées de lahars ont été signalées en décembre 2010 (56 événements) et en janvier 2011 (59 événements), après des précipitations mensuelles cumulées respectivement évaluées à 1836 mm et 2592 mm (Figure 30). Le maximum pluviométrique de la mousson 2010-2011 est tombé en mars 2011 (total de 3102 mm), et correspond au troisième principal pic d'occurrences des lahars (46 événements). Près de 70% des événements (sur un total de 232 dont l'heure de déclenchement est connue) ont eu lieu dans l'après-midi entre 14h et 19h, ainsi que cela avait été déjà signalé pour l'Indonésie au Merapi par Lavigne (1998) et au Semeru par Lavigne et Suwa (2004). La soixantaine de lahars survenus le matin ou pendant la nuit correspond à une saturation des dépôts après d'intenses précipitations répétées sur plusieurs jours, liées au réchauffement du Pacifique occidental en situation de Niña durant la fin de l'année 2010 et au début de l'année 2011.

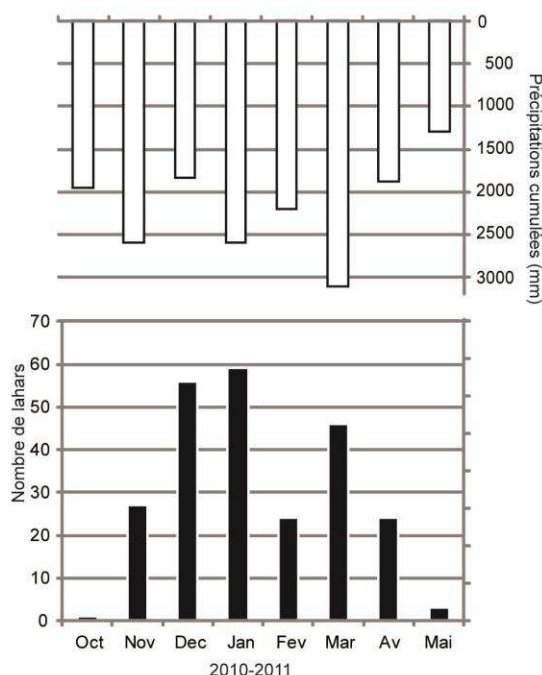


Figure 30 - Précipitations cumulées (mm) et nombres de lahars par mois sur l'ensemble du Merapi lors de la saison des pluies 2010-2011 (d'après les relevés pluviométriques du BPPTK, juin 2011)

Pendant cette période, le refroidissement du Pacifique central et oriental contraste avec le réchauffement des eaux de surface du Pacifique occidental, associé à de fortes températures dans l'Océan Indien également (NOAA, 2012). Ce phénomène a été à l'origine de saisons humides particulièrement intenses en Asie du Sud-est et en Australie tropicale en 2010-2011, marquées notamment par les inondations catastrophiques de Bangkok et du Queensland. La Niña survenue en

2010-2011 a en effet été identifiée par la NOAA comme un épisode de forte intensité : entre octobre 2010 et février 2011, la température des eaux de surface au centre-est du Pacifique était inférieure de 1,3°C à 1,5°C à la normale. Ainsi, au Merapi, la mousson 2010-2011 a été fortement pluvieuse, avec un total de précipitations cumulées s'élevant à 17 436 mm sur l'ensemble des 5 stations de mesure (correspondant aux 5 observatoires du Merapi, cf. chap. 1, Figure 12) pendant la mousson (octobre 2010-mai 2011). Pendant la décennie 2000-2010 au Merapi, la distribution spatiale et l'intensité de la saison des pluies 2010-2011 apparaît nettement supérieure aux autres années présentées (Figure 31). Les moyennes mensuelles par station ne descendent pas sous 358 mm, et dépassent 400 mm dans les quatre autres ; les autres années, aucune station n'atteignait une quantité moyenne de 400 mm. Cette abondance de précipitations en 2010-2011 reprend la logique de répartition spatiale visible les autres années : les pluviomètres situés respectivement au sud à l'ouest et au nord-ouest (Kaliurang, Ngepos et dans une moindre mesure Jrahah et Babadan) sont les plus arrosés, exposés aux flux de mousson (Lavigne *et al.*, 2000a). En revanche, le site situé plein nord, Selo, à l'abri des flux de mousson, est moins humide, et semble surtout concerné par des précipitations orographiques, qui sont généralement d'intensité plus modeste (Lavigne *et al.*, 2000a). La saison des pluies 2010-2011 a donc apporté une quantité d'eau plus intense que les années précédentes, et explique très certainement pourquoi les abondants dépôts de l'éruption de 2010 ont été rapidement, si ce n'est immédiatement, remobilisés en lahars.

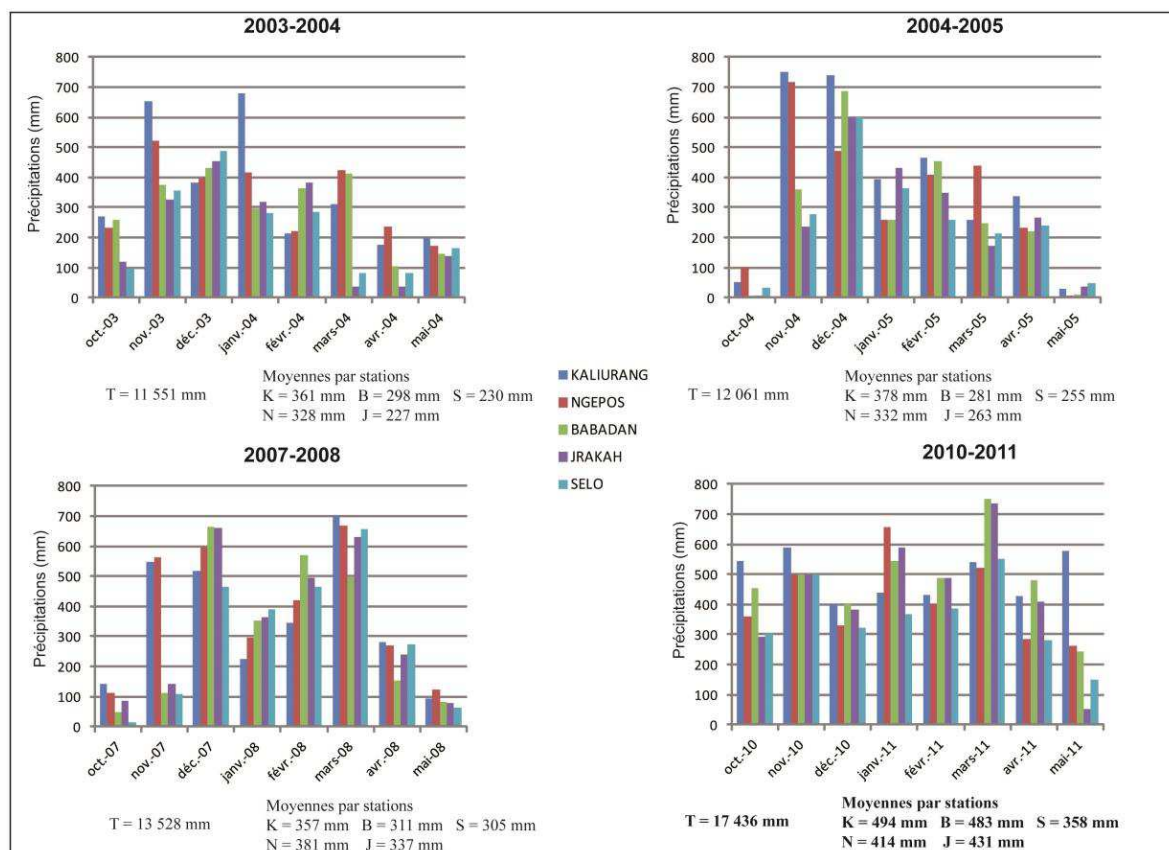


Figure 31 - Précipitations (mm) durant 4 saisons des pluies au Merapi

T : Total de précipitations sur l'ensemble de la saison humide

(d'après les relevés des pluviomètres de K : Kaliurang ; N : Ngepos ; B : Babadan ;

J : Jrahah ; S : Selo, BPPTK 2011).

Le calcul des intensités de pluie avant le déclenchement des lahars, établis pour 135 événements en fonction des informations de la base de donnée (intensité et durée des précipitations,

mesurées dans les observatoires du volcan, voir annexe A.1), montre une intensité moyenne de 20,3 mm/h nécessaire pour entraîner un lahar, proche des seuils de 20 mm/h (Sudradjat et Tilling, 1984) et 25 mm/h (Takahashi, 1994) mesurés au Merapi. Les précipitations les moins intenses (< 10 mm/h) qui ont été suivies par des lahars sont celles qui sont survenues après 7 jours de pluie abondante (Lavigne *et al.*, 2000a). L'absence de radar ne permet pas de confirmer ni de préciser les observations météorologiques de Lavigne sur la distribution spatiale des précipitations et les lieux de déclenchement des lahars (1998). On peut regretter également l'absence de pluviomètre sur le talus proximal du volcan, dans la zone de déclenchement des lahars, pour des mesures plus fines des seuils de déclenchement.

1.4 Extension des lahars

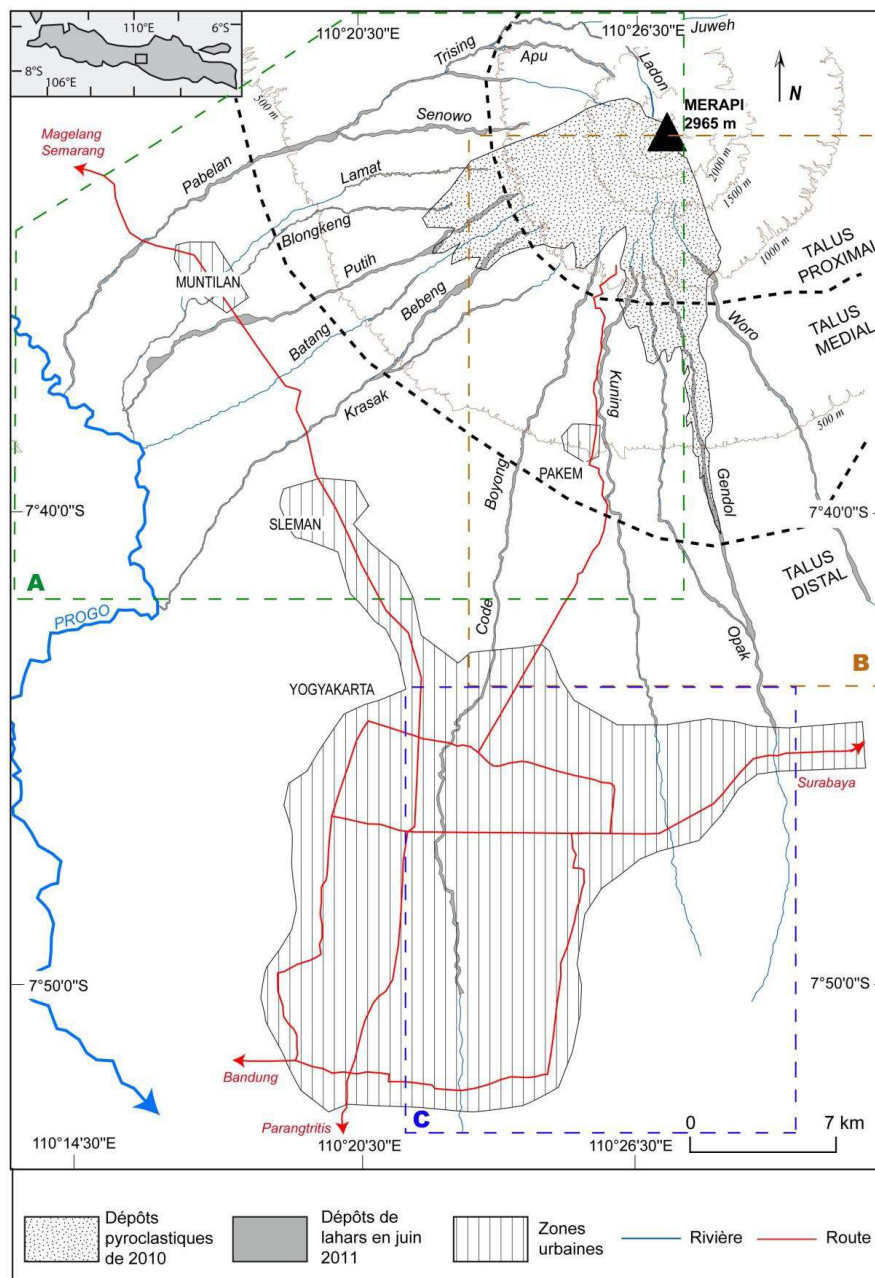
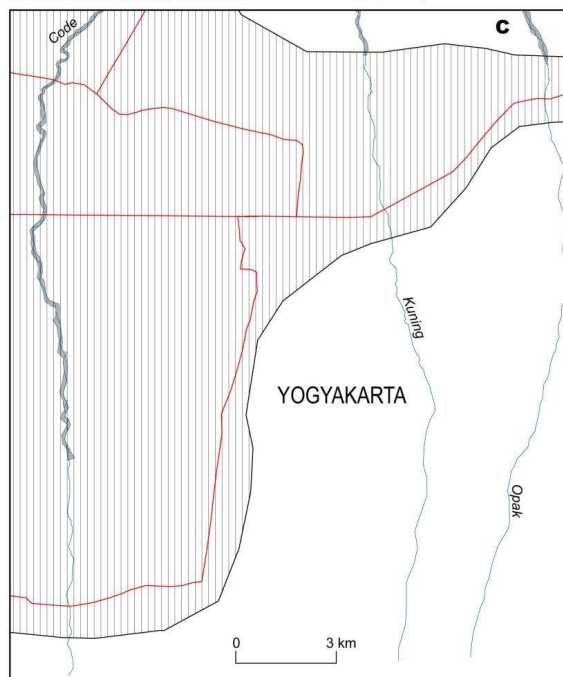
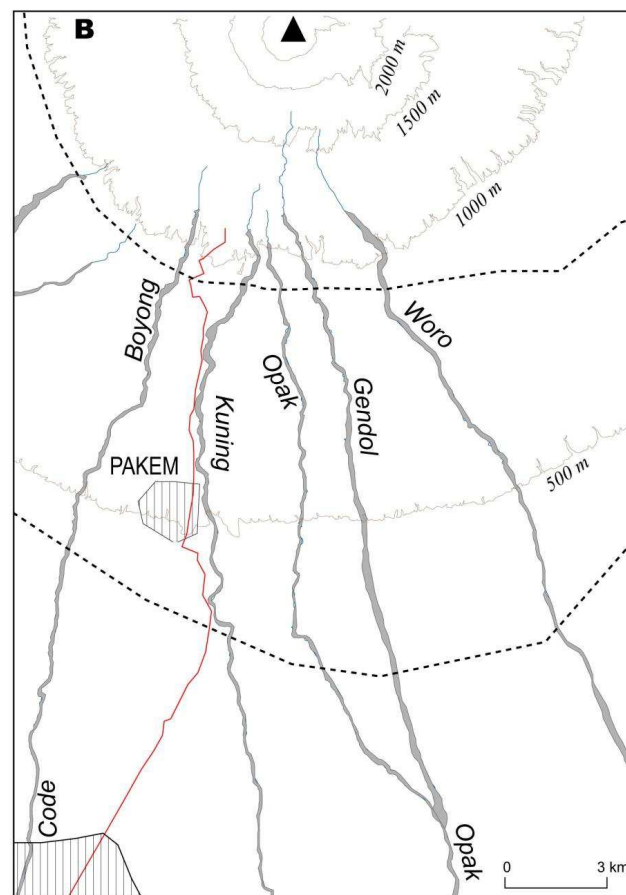
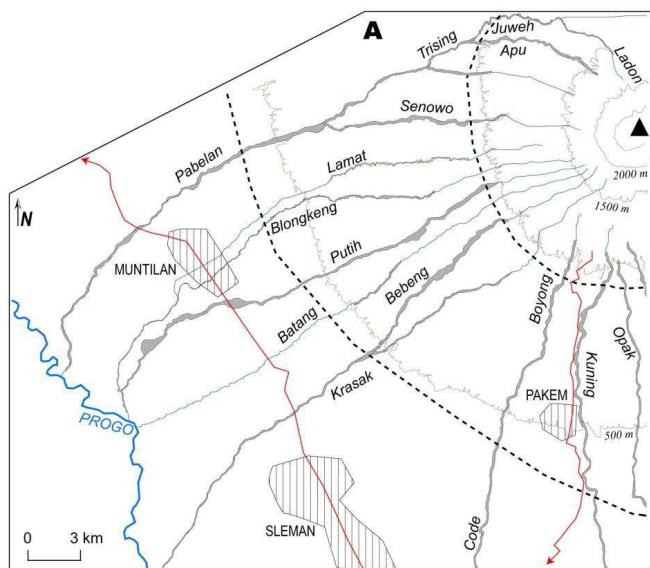


Figure 32 - Extension des lahars du Merapi en 2010-2011 – Aperçu
(d'après l'image GeoEye 2011 et mesures de terrain)



A : Versant ouest
B : Versant sud
C : Agglomération de Yogyakarta

La cartographie des dépôts à l'aide de l'image satellite GeoEye prise le 11 juin 2011 permet de se rendre compte de l'extension atteinte par les lahars pendant la saison des pluies 2010-2011.

Contrairement aux lahars survenus dans les années 1990 et 2000 (Lavigne *et al.*, 2000a ; Lavigne et Thouret, 2002), ceux qui ont suivi l'éruption de 2010 ont atteint des extensions pouvant excéder les 15 km (Figure 32), entraînés peut-être par une grande quantité d'eau en période de Niña. Par commodité, « l'extension » est entendue comme étant la distance maximale depuis le cratère le long de laquelle se sont étendus les lahars, et non depuis la zone de déclenchement. Celle-ci est localisée dans les ravines qui se forment sur les dépôts pyroclastiques qui recouvrent le cône actif et l'amont du talus proximal de l'édifice. Alors que les lahars survenus depuis le milieu des années 1990 n'ont pas atteint d'extension particulièrement élevée (Lavigne, 1998 ; Lavigne *et al.*, 2000a), ceux de 2010 frappent par l'ampleur des dépôts qu'ils ont laissé jusqu'aux confluents successifs des affluents du Progo sur le versant ouest, et au-delà du confluent entre la Opak et la Gendol sur le versant méridional. De telles distances n'avaient pas été signalées depuis les années 1931-1932 et 1969-1978 (Schmidt, 1934 ; Jitousono *et al.*, 1995 ; Shimokawa *et al.*, 1995).

2. Variabilité spatio-temporelle des débits : mesures et estimations d'après vidéos et enquêtes de terrain

2.1 Profondeur des écoulements et estimations des débits de lahars

L'extension des lahars jusque sur le talus distal du volcan est un phénomène peu représenté au Merapi durant le XX^e siècle ; à ce titre, quelques informations sur les caractéristiques du flux sur la partie distale des rivières méritent d'être avancées. L'étude détaillée de la dynamique des lahars dépasse le cadre de cette étude, mais quelques ordres de grandeur, mesurés sur le terrain et à l'aide de quelques enregistrements vidéo, peuvent être présentés. Pour 143 lahars survenus en 2010-2011, les profondeurs moyennes visibles sur le terrain ou communiquées par le BPPTK ne dépassent guère les 1 à 1,5 m. Celles-ci, mesurées au niveau des barrages sur les talus médial et distal, attestent que les lahars n'ont pas présenté de débits particulièrement élevés une fois qu'ils avaient dépassé le talus proximal, au niveau duquel aucune donnée ne permet encore d'estimer la vitesse ou la profondeur des écoulements.

Les enregistrements vidéo des lahars (Tableau 19) montrent que les débits moyens des lahars sur le talus distal de la Gendol ont été estimés de 121 m³s⁻¹ à 239 m³s⁻¹, avec toutefois des débits de pointe > 400 m³s⁻¹.

Date	Rivière	Débit de pointe Q_p enregistré m ³ s ⁻¹	Débit moyen Q m ³ s ⁻¹	Runoff R m ³
28/02/2011	Gendol	540	238,8	716 640
08/03/2011	Boyong	100	44,1	132 300
14/03/2011	Gendol	405	148,5	445 350
21/03/2011	Gendol	225	117,3	351 990
22/03/2011	Opak	245	112,4	-

Tableau 19 - Débits des lahars d'après enregistrements vidéo personnels (détails : voir annexe A.5)

Où :

$$Q = V \times L \times P$$

Avec V : Vitesse de surface ; L : Largeur du flux ; P : Profondeur du flux

$$R = \sum Q_5 \times 300$$

Avec Q_5 : mesures instantanées des débits toutes les 5 minutes.

À partir des vidéos, il a été possible de calculer le runoff R , qui quantifie en m^3 le volume de matériel transporté par les lahars et donc d'en quantifier la magnitude. Même les événements les moins intenses (de débit moyen $Q < 100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) transportent au moins $100\,000 \text{ m}^3$ de matériel volcanoclastique, traduisant bien le rôle morphodynamique essentiel des lahars dans la construction des volcans composites.

2.2 Variabilité des pulsations et des débits au cours d'un même épisode

2.2.1 Les pulsations des lahars

Les débits des lahars sur le talus distal sont marqués par une grande variabilité au cours d'un seul événement. Un seul lahar est en effet caractérisé par plusieurs pulsations (Pierson et Scott, 1985 ; Iverson, 1997 ; Vallance, 2000), ainsi que par un affaiblissement temporel de son intensité (Pierson & Scott, 1985 ; Pierson, 1995 ; Cronin *et al.*, 1997 ; Lavigne *et al.*, 2000a,b ; Lavigne & Thouret, 2002 ; Waythomas *et al.*, sous presse).

Les quelques mesures de débit qui ont pu être réalisées en continu sur un seul événement, dans la Gendol, notamment, montrent des hydrogrammes variables, à régime monomodal, bimodal voire trimodal, chaque pic correspondant à une pulsation (Figure 33). Les caractéristiques des lahars peuvent changer d'un événement à l'autre. Le comportement d'un seul écoulement lui-même n'est pas régulier ; l'événement du 28 février 2011, après le passage du front à $Q = 253,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ subit une légère diminution de son intensité à peine 10 min après. Le même schéma d'un pic de pulsation suivi d'une décroissance du débit se produit de nouveau à $T+20$ puis à $T+30$, lorsque le débit de pointe est atteint à $Q_p = 540 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figure 34A). On retrouve la même irrégularité dynamique lors de l'événement du 21 mars, avec des valeurs moindres ($Q_p = 225 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). En revanche, le lahar du 14 mars 2011 ne présente pas d'effet de front aussi visible que pour les autres événements (Figure 34B et C), pour lesquels le débit augmentait quasi-instantanément de $0,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (débit moyen du lit mineur de la rivière) jusqu'à $Q > 100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. L'intensité du lahar du 14 mars augmente progressivement, en présentant d'abord la forme d'un écoulement assez dilué, peu rapide et très peu profond qui s'intensifie peu à peu en une vingtaine de minutes. Dans les trois cas, le débit de pointe ne coïncide pas avec le passage du front lorsqu'il y en a un, puisque les maxima enregistrés l'ont tous été à $T+30$ (Figure 33 et Figure 34). Lavigne et Thouret (2002) avaient déjà évoqué ce décalage temporel entre le front et le débit de pointe de l'écoulement. Dans le cas des lahars du 28 février et du 21 mars, le lahar se poursuit à des débits plus faibles pendant encore une à deux heures. Les vidéos n'ont pas pu suivre la fin des lahars, principalement parce que la nuit tombe assez vite en fin d'après-midi, et, d'autre part, parce que les écoulements dégageaient d'abondants panaches de vapeur d'eau, provoqués par la chaleur des matériaux pyroclastiques remobilisés. Les pulsations des lahars, bien représentées dans le cas des événements qui ont pu être enregistrés et mesurés à la Gendol, sont provoquées non seulement par des changements dans la topographie des chenaux, mais sont aussi corrélées à des variations dans l'intensité des pluies qui tombent en amont (Lavigne et Suwa, 2004). Les infrastructures tels les barrages de type sabo-dam, les ponts, les enrochements et autres constructions bâties sur les berges ou en travers d'une rivière peuvent également provoquer des pulsations en bloquant momentanément ou au contraire en libérant brutalement l'écoulement, ainsi qu'illustré par la vidéo d'un lahar survenu dans la Kuning (Figure 35).

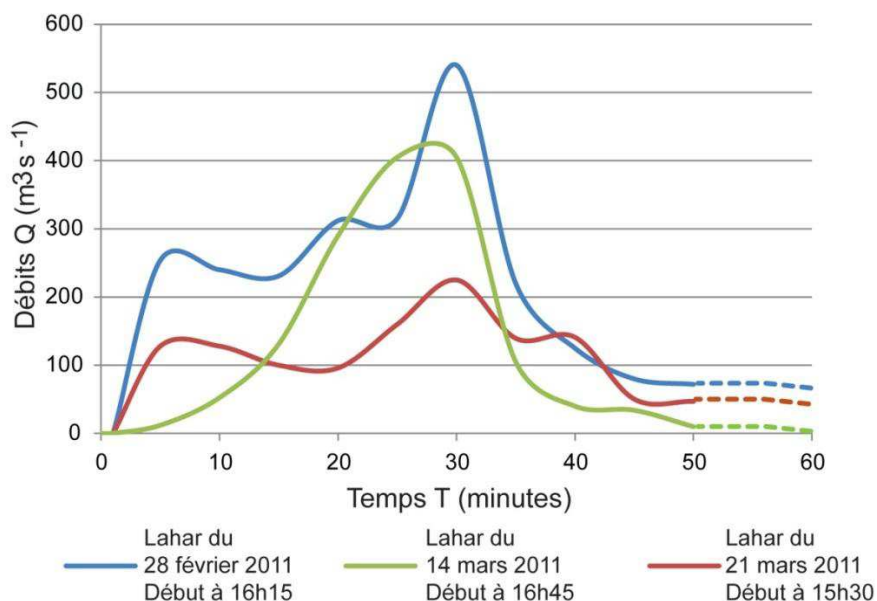


Figure 33 - Hydrogrammes des trois lahars filmés dans la Gendol (février-mars 2011, Plumbon)

2.2.2 Embâcles et ruptures : effets sur la dynamique du flux

Les embâcles temporaires dont les ruptures brutales influencent nécessairement le débit du lahar, peuvent être renseignées et quantifiées. La base de données met en évidence, sur la Opak, le rôle d'un pont dans un village situé à 14 km du cratère, Pangung. Après 4 occurrences de lahars en novembre et décembre 2010, le pont de petites dimensions (16,5 m × 4 m) a été rapidement comblé par les dépôts ; la rupture est survenue dans la nuit du 3 janvier 2011, provoquant un gonflement du débit à l'aval du pont, et une inondation qui a enseveli plusieurs habitations et des rizières.

L'aspect spectaculaire des ruptures de pont permet d'en retrouver des événements filmés et diffusés sur les réseaux sociaux ou les sites de partage multimédia comme *YouTube*. Parmi la trentaine de vidéos de lahars de durée > 1 min visibles sur *YouTube* (cf annexe A.4), une seule, prise pendant 5 min 41 le 4 novembre 2010 sur un plan fixe au pont de Padasan sur la Kuning (talus médial), permet d'apprécier les variations du débit du lahar avant et après la rupture du pont (Figure 35A et B). La localisation précise du site dans le descriptif du document fourni par l'auteur a permis de le retrouver et d'y réaliser les mesures nécessaires au calcul de la section mouillée et de la vitesse du surface du flux *a posteriori*. Le débit du lahar de la Kuning double après la rupture brutale du pont, passant instantanément de $Q_1 = 235,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à $Q_2 = 545,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figure 35A), notamment par accélération gravitaire de l'écoulement lorsque l'obstacle a été emporté ($V = 3,45 \text{ m/s}$ avant la rupture contre $6,9 \text{ m/s}$ après). Le lahar continue de s'écouler avec des débits estimés à $Q > 500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pendant près de 2 min, avant que la profondeur de l'écoulement et la vitesse ne diminuent légèrement ($Q_3 = 376,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ puis $Q_4 = 251,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Le débit du lahar à la fin de la vidéo est estimé à $Q_5 = 213,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figure 35B). Le phénomène d'embâcle, suivi par la brusque rupture, amène un doublement momentané du débit, provoquant la propagation en aval d'une pulsation plus énergique, susceptible de produire des débordements dommageables en aval. Les deux exemples ci-dessus montrent que les embâcles au niveau des ponts, provoqués par les débris transportés par les lahars, peuvent durer plusieurs jours (Opak) ou bien au contraire se former et céder quasiment instantanément en l'espace de quelques minutes (Kuning).

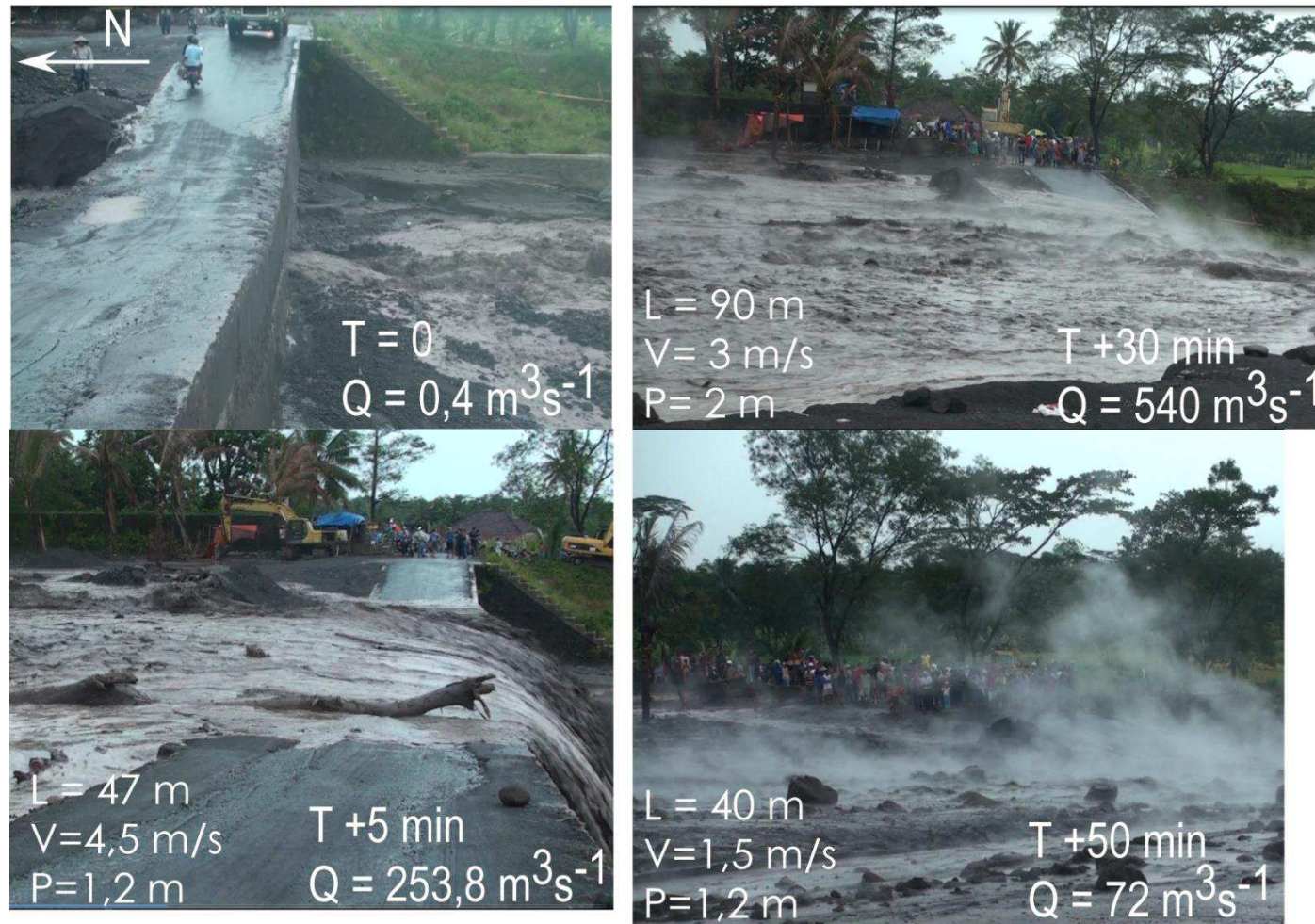
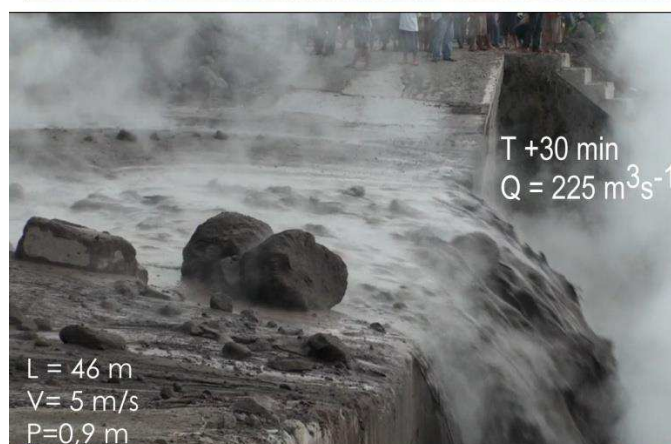
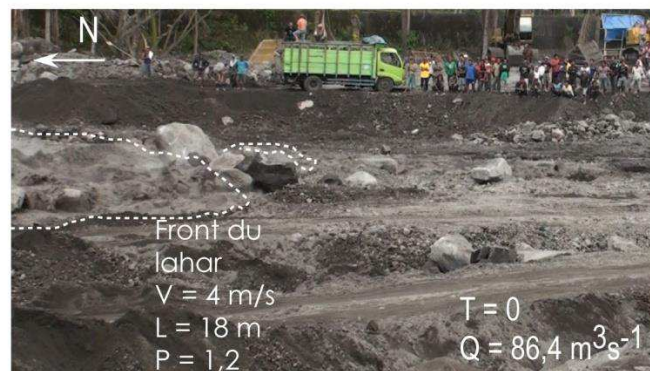


Figure 34 - Prises de vue des lahars de la Gendol filmés à Plumbon (L = Largeur ; V = Vitesse de surface ; P = Profondeur)

A : Lahar du 28 février 2011 (le pont des deux premières photos est visible sur la partie droite des deux dernières photos)



B : Lahar du 14 mars 2011



C : Lahar du 21 mars 2011



$T_0 \text{ à } T+40 \text{ s}$
 $Q_1 = 235,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$



$T+46 \text{ s}$
 $Q_2 = 545,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Figure 35 - Prises de vue du lahar de la Kuning, survenu à Padasan le 4 novembre 2010, 15h
 (L= Largeur: V = Vitesse de surface ; P = Profondeur)

A : Embâcle et rupture du pont

(Source Youtube, chaîne de *lintaryogi*, <http://www.youtube.com/watch?v=qyFTkXRPM5o>)



T+1 min 26 s
 $Q_3 = 376,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$
 L = 27,3 m
 P = 2 m
 V = 6,9 m/s



T+3 min 06 s
 $Q_4 = 251,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$
 L = 27,3 m
 P = 2 m
 V = 4,6 m/s



T+5 min 30 s
 $Q_5 = 213,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$
 L = 27,3 m
 P = 1,7 m
 V = 4,6 m/s

B : Diminution progressive du débit

(Source Youtube, chaîne de *lintaryogi*, <http://www.youtube.com/watch?v=qyFTkXRPM50>)

2.3 Les lahars majeurs de 2010-2011

Au moins cinq événements ont été particulièrement intenses et font partie des lahars les plus importants que le Merapi a pu connaître depuis le début du XX^e siècle. De gros lahars ont dû se produire dans la partie proximale de la Senowo comme en témoignent certains dépôts (cf. infra, chap. 5), mais demeurent mal renseignés. La chronologie des événements qui se sont étendus à au moins 20 km du cratère est mieux connue, compte tenu des dégâts qu'ils ont pu provoquer. Les débits de ces événements à des sections données ont été calculés lorsque les évidences de terrain ou les rapports du BPPTK le permettaient, mais aucun enregistrement vidéo complet n'a pu être retrouvé.

2.3.1 Les lahars de la Code

Le 29 novembre 2010, un lahar s'est étendu jusque dans la Code, qui est le nom donné à la partie distale de la Boyong, et a traversé l'agglomération de Yogyakarta. Les images d'une vidéo amateur montrent l'arrivée d'un écoulement hyperconcentré dont le front est composé de débris végétaux, circulant à 3,5 m/s. L'écoulement atteint rapidement une profondeur de 1,6 m (Figure 36) pour une largeur de 20 m au niveau du pont représenté, soit un débit de $Q = 112 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Le lahar a atteint une profondeur maximale de 2,2 m (BPPTK, Figure 37) et a inondé plusieurs maisons situées le long de la rivière en y laissant plusieurs décimètres de dépôts boueux. Survenu juste à la fin de l'éruption, l'événement a montré que l'occurrence d'écoulements hyperconcentrés était possible dans l'agglomération de Yogyakarta. Deux autres lahars ont atteint le centre-ville le 19 mars et le 1^{er} mai 2011. Dans le cas du 19 mars, le lahar est survenu après de très intenses pluies sur le versant sud du Merapi ($> 75 \text{ mm/h}$), et a atteint des profondeurs $> 2 \text{ m}$ en ville. Quant au 1^{er} mai, l'intensité des précipitations était de 41 mm/h et l'écoulement signalé à 17h45 sur le talus proximal a atteint le nord de l'agglomération situé 21 km plus en aval en 1 heure seulement. Au niveau du périphérique nord de Yogyakarta, le débit mesuré était de $Q = 178,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à 18h50, puis de $Q = 237 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à 19h15 (profondeurs données par le BPPTK : 1,8 m pour la première pulsation et 2,4 m pour la seconde ; largeur de 17 m et vitesse de surface estimée à 5,8 m/s). Les coulées de débris, toutefois, n'ont jamais atteint Yogyakarta ; la fraction la plus grossière de la charge solide était certainement déposée en amont, sur les talus proximal et médial. Seul un écoulement plus dilué parvenait dans la Code.



Figure 36 - Le lahar de la Code du 29 novembre 2010, +1 min 48 après le passage du front
(Source : Youtube, chaîne de fariszsolmus, <http://www.youtube.com/watch?v=u4k2aEk162o&feature=related>)



Figure 37 - Écoulement hyperconcentré du 29 novembre 2010 dans la Code à Yogyakarta
(© Kompas, Wawan H. Prabowo ; photo prise en direction du sud)

2.3.2 L'événement du 9 janvier 2011 dans la Putih

Les pluviomètres situés sur le flanc ouest du volcan (Babadan et Ngepos) ont enregistré un total de 140 mm de pluies survenues entre 16h50 et 22h05 ayant produit une intensité de précipitations de 28 mm/h en amont de la rivière Putih. Une telle valeur n'est pas la plus forte enregistrée (certaines intensités ont dépassé les 40 mm/h), mais la pluie a duré 5 heures, et a contribué à la saturation en profondeur du matériel pyroclastique. À 18 heures, l'écoulement a été signalé à l'observatoire de Ngepos (à Srumbung, voir chap. 2). Le rapport officiel fait état d'un lahar, circulant sur l'ensemble des 66 m de largeur de la vallée, avec une profondeur estimée à 5 voire 6 m, comme il est passé très près sous le tablier du pont. Le lahar est arrivé sur le talus distal à Jumoyo, situé 6,5 km plus en aval de Ngepos, vers 18h30 ce qui permet d'estimer la vitesse moyenne de l'écoulement à 3,6 m/s. Le débit à Ngepos (talus médial) peut donc être estimé à au moins $Q = 1300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.



Figure 38 - Jumoyo et la route Semarang-Yogyakarta en cours de déblaiement au lendemain du passage du lahar du 9 janvier 2011
(www.tempelinfo.blogspot.fr; photo prise en direction du nord)

À Jumoyo, le lahar s'est révélé trop volumineux pour pouvoir emprunter les buses aménagées sous la quatre-voies Semarang-Yogyakarta. Momentanément bloqué, le flux s'est accumulé dans le village sur 467 483 m² (d'après image satellite GeoEye 2011) et a débordé sur la route sous laquelle il ne pouvait passer. Celle-ci avait été fermée à la circulation 15 minutes avant, en prévision d'une éventuelle inondation. Effectivement, 500 m ont été ensevelis sous des dépôts épais de quelques centimètres à plus de 3 m à proximité du canal (Figure 38). Un peu avant 19h, le lahar a atteint le village de Sirahan, situé 3 km en aval, après une sinuosité. La hauteur maximale du flux semble avoir atteint plus de 3 m (épaisseur des dépôts dans les habitations). En raison de la sinuosité du chenal de la Putih, le lahar a débordé et s'est étendu sur plus de 743 742 m² (d'après image satellite GeoEye 2011). La route a été entièrement détruite, ainsi qu'une centaine de maisons situées près de la rivière (voir chap. 4) dans les deux villages.

2.3.3 L'événement du 30 mars 2011 dans la Pabelan à Tamanagung



Figure 39 – L'endommagement des piles des ponts de Tamanagung après le lahar du 30 mars 2011.

Le pilier mesure 10 m × 20 m × 5 m dans sa partie basale.
(clichés E. de Bélizal, avril 2011)

Le plus important lahar a eu lieu le 30 mars 2011, sur la rivière Pabelan dans Tamanagung. De fortes pluies, atteignant 269 mm en fin de journée, ont été signalées sur les flancs nord et ouest du volcan, avec des intensités de précipitations estimées entre 39,5 mm/h et 52 mm/h. À 17h00 l'observatoire de Babadan signale que deux lahars traversent respectivement les rivières Trising et les rivières Senowo ; les deux écoulements se rencontrent quelques minutes plus tard dans la Pabelan, qui est l'exutoire commun des deux rivières. À 17h55, le village de Tamanagung, situé à 17 km en aval de Babadan, sur le talus distal, a été dévasté par une première pulsation suivie par une autre 45 minutes plus tard. L'une des deux piles du pont qui n'ont pas été emportées par le flux montre que le lahar a atteint une profondeur maximale de 7 m et une largeur minimale 53 m, pour un débit maximal d'au moins $Q = 1800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figure 39). Aucune perte humaine n'a été signalée, mais les 19 maisons du village ont été entièrement détruites, et un pilier du grand pont du village sur lequel passe la quatre-voie Semarang-Yogyakarta a été emporté et déposé 900 m en aval.

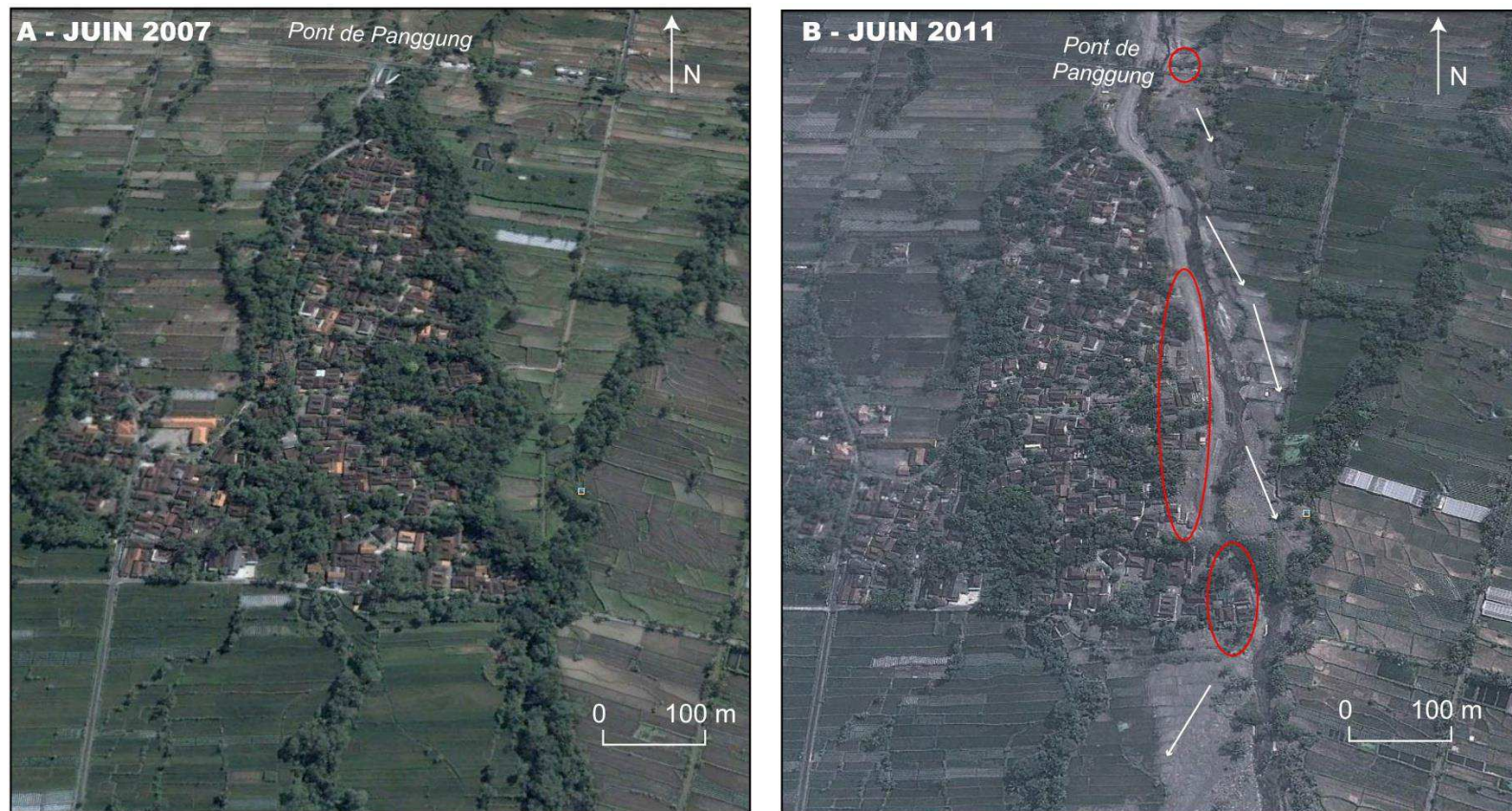
À l'aide de la base de données et d'une série de méthodes combinant enquêtes et mesures de terrain ainsi que l'analyse vidéo, une information quantifiée a pu être apportée concernant les débits de quelques lahars, notamment le déroulement des événements majeurs. Les lahars du Merapi qui ont suivi l'éruption de 2010 sont caractérisés par une fréquence particulièrement élevée, et surtout par une distribution spatiale sur la quasi-totalité des rivières situées en contrebas du cône actif orienté vers l'ouest et le sud. L'occurrence simultanée de lahars sur plusieurs cours d'eau à la fois n'avait pas été évoquée depuis les années 1990 (Voight et al., 2000 ; Lavigne et al., 2000), de même que l'extension sur le talus distal, qui n'avait pas été signalée depuis les années 1970 (Putih) et les années 1930 pour les autres rivières (Lavigne et al., 2000a). Cette extension élevée des lahars sur un talus distal qui n'avait plus été frappé depuis plusieurs décennies a été à l'origine de changements morphologiques que la rubrique suivante se propose de caractériser, de quantifier et d'expliquer.

II. LES RÉPONSES DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE : EXEMPLES DES PROCESSUS MORPHOGÈNES DES LAHARS À ÉCHELLE LOCALE

Les occurrences répétées des lahars ont conduit à des changements majeurs dans les paramètres géomorphologiques des réseaux hydrographiques, principalement en aval où les lits des rivières ne drainent plus des fonds de vallées à parois subverticales (> 30 m sur le talus proximal), mais circulent pratiquement à fleur de sol. Ces conséquences sont d'autant plus rapides que la plupart des lahars consécutifs à l'éruption de 2010 ont circulé dans des portions de rivière qui n'avaient pas été touchées par de tels épisodes pendant plusieurs décennies. Les lahars y ont formé en l'espace de quelques mois des corridors larges de plusieurs dizaines de mètres (Figure 40) sous l'effet de plusieurs processus morphodynamiques : l'incision, l'érosion des berges, les défluviations et les débordements, présentés dans cette rubrique à l'aide d'exemples pris à échelle locale.

1. Incision et élargissement des chenaux : réactivation et formation des corridors de lahars

Le rôle morphogène des lahars contribue, dans le cas des rivières encaissées des talus proximal et médial, à élargir les corridors de lahars préexistant par l'érosion régressive des berges. Les fonds de vallées remplis de dépôts pyroclastiques ou volcanoclastiques sont également facilement incisés par les lahars, permettant d'estimer la puissance érosive des lahars. Pour quantifier leurs impacts géomorphologiques sur la forme des vallées dans lesquelles coulent les rivières au niveau des talus proximal et médial, trois sites ont été choisis, le premier au nord-ouest (Senowo), le second à l'ouest (Putih), et le troisième sur le versant méridional (Gendol). La nature du substrat (dépôts volcanoclastiques anciens dans le cas de la Putih, dépôts pyroclastiques de 2010 dans la Gendol) met en évidence des rythmes d'incision différents. Les mesures de l'incision naturelle, toutefois, n'ont pas pu se prolonger plus loin sur le talus médial, à cause de l'emprise de l'extraction de blocs et de sables dans les dépôts de lahars (chap. 6 et 7).



**EXEMPLE D'UN CORRIDOR DE LAHAR
LA RIVIERE OPAK AUX VILLAGES DE PANGGUNG ET TEPLUK
COMMUNE (DESA) ARGOMULYO**

Le corridor de lahar a incisé le chenal de la Opak, et tend à s'élargir vers l'ouest, dans le village.
Repérer les traces de débordements ponctuels (lobes grisâtres vers les rizières et flèches blanches) sur plusieurs dizaines de mètres.
Plusieurs maisons ont déjà été endommagées voire détruites, puisqu'elles se sont retrouvées à l'intérieur du corridor (cercles rouges).
L'exemple est détaillé en II. 1.2.1

Figure 40 - Qu'est-ce qu'un corridor de lahar ?

Aperçu diachronique de la Opak en 2007 et en 2011, après la formation du corridor de lahar (source : Google Earth).

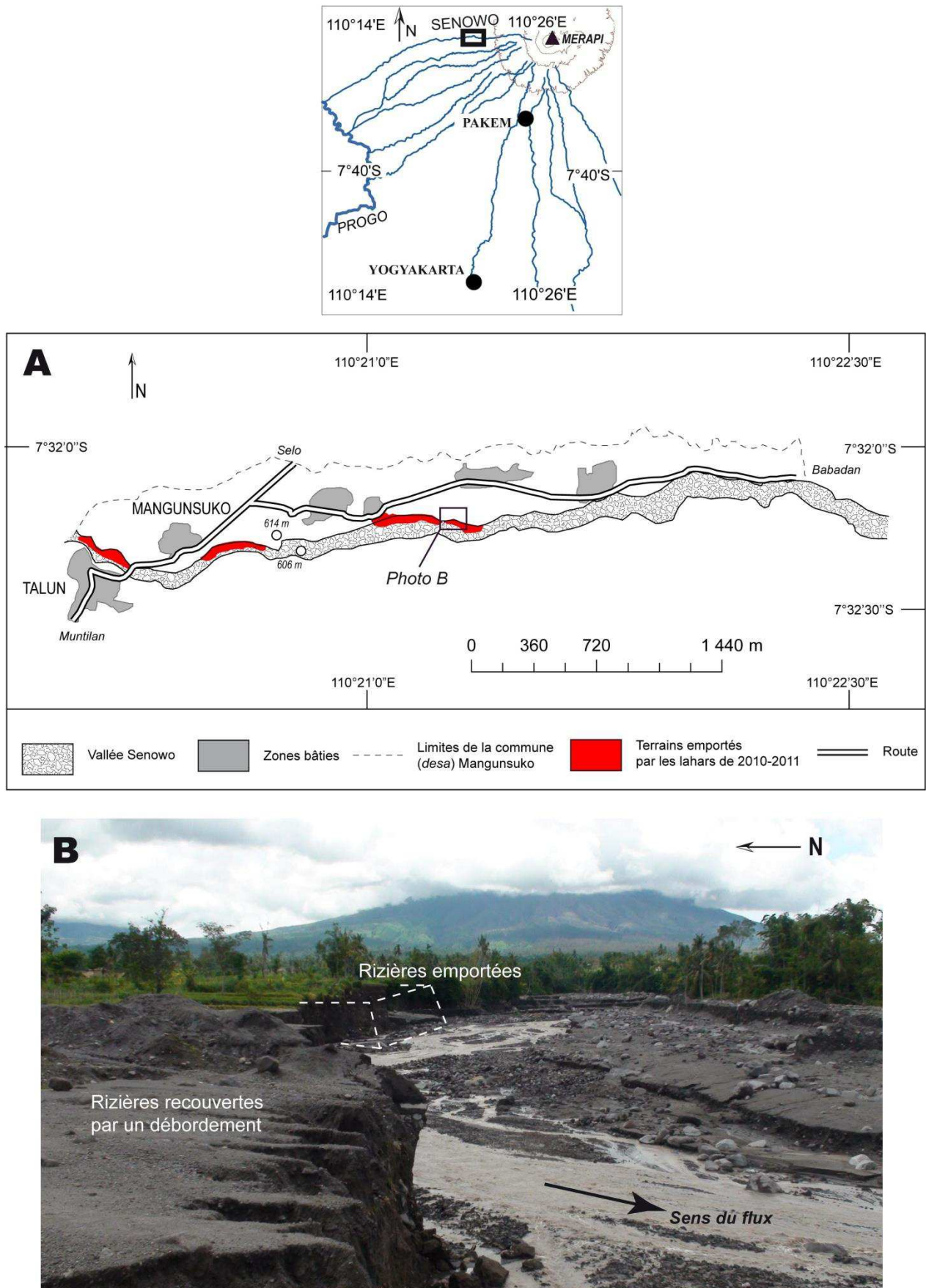


Figure 41 - L'élargissement de la vallée Senowo : un exemple de corridor de lahar réactivé sur le talus médial

(A : d'après images Spot 5 2008 et GeoEye 2011 ; B : cliché E. de Bélizal, avril 2011)

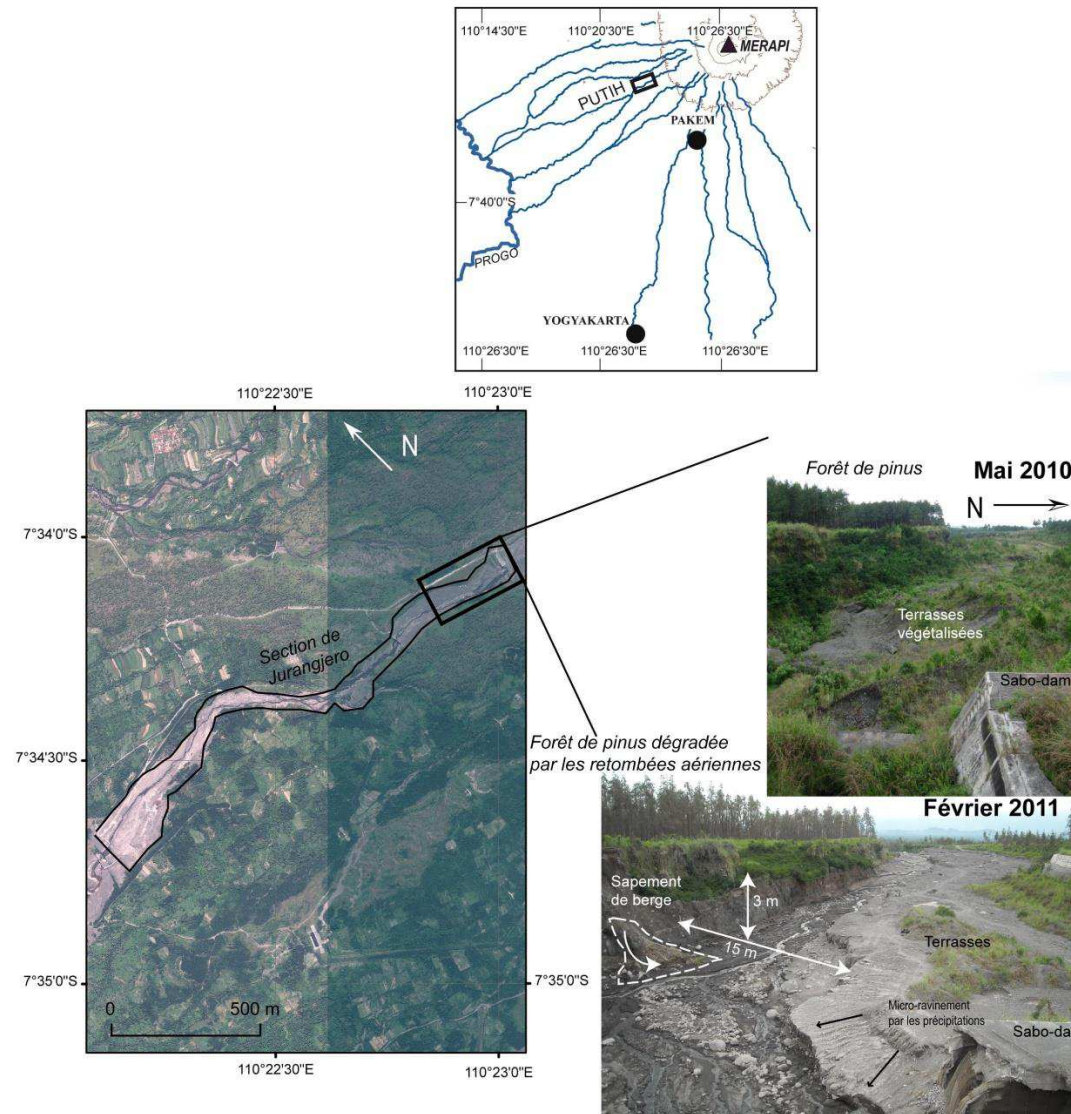


Figure 42 - Incision et élargissement dans les dépôts volcanoclastiques de la Putih à Jurangjero
(image GeoEye 2011 ; clichés E. de Bélizal)

1.1 L'érosion dans les vallées des talus proximal et médial : réactivation des corridors de lahars préexistant

1.1.1 **Élargissement des vallées : l'exemple de la Senowo**

L'érosion provoquée par les lahars a causé, dans les rivières encaissées, des affaissements de berge qui ont contribué à l'élargissement du réseau hydrographique. Le long de la Senowo, des parcelles cultivées ont ainsi disparu. C'est dans la commune de Mangunsuko, le long de la Senowo, que ce phénomène est le plus remarquable. On y observe d'après analyse diachronique des images satellites et digitalisation des berges (Spot 5 2008 et GeoEye 2011) la disparition de 36 423 m² de surfaces agricoles par le sapement répété des lahars (Figure 41), qui représente un manque à gagner de plusieurs dizaines de millions de rupiahs pour les agriculteurs de la commune. Ce phénomène se complète, ponctuellement, par des débordements qui recouvrent des surfaces réduites sur des berges élevées de 4 à 6 m en cas de lahars de grande intensité (profondeur > 5 m) ; ils demeurent toutefois moins fréquents et moins étendus que ceux que l'on retrouve plus en aval, là où les rivières ne sont plus encaissées (cf. *infra* II.3.). Ces processus d'élargissements se traduisent par des éboulements qui peuvent amener la destruction de certaines voies d'accès au fond de vallée (cf. chap. 6 et 7). D'autres élargissements de vallées ont eu lieu dans la Pabelan, mais demeurent difficiles à quantifier (pas de couverture satellite GeoEye).

1.1.2 **Incision et élargissement dans les fonds de vallée volcanoclastiques**

À Jurangjero, dans la vallée Putih à 7 km du cratère, les lahars ont formé un nouveau chenal. L'analyse des clichés pris à un an d'intervalle, avant et après l'éruption, montrent que la rivière qui coulait dans un lit mineur étroit (3,5 m de large) en 2010, circule désormais dans un chenal élargi de plus de 15 m et incisé de 3 m sur la section de 2 km (Figure 42). On constate donc un volume d'érosion d'environ 90 000 m³ entre novembre 2010 et début février 2011, pour 30 occurrences de lahars.

On constate que la morphologie du fond de vallée visible avant l'éruption est conservée dans ses formes essentielles en 2011. Les niveaux subhorizontaux aménagés dans les dépôts volcanoclastiques par les activités d'extraction de blocs et de sables (voir Partie 3), débarrassés de leur couverture végétale (formée d'herbacées *Aristidae* et de jeunes pins disséminés par les conifères des forêts de l'interfluve), sont parfaitement reconnaissables et forment désormais des niveaux de terrasses surplombant le nouveau chenal incisé et élargi de la Putih (Figure 42).

1.1.3 **Incision et élargissement par les lahars dans les dépôts pyroclastiques**

La Gendol était avant l'éruption une vallée profondément encaissée (50 m au niveau du talus proximal à Kaliadem, 20 m au niveau du talus médial à Manggong). La plupart des coulées pyroclastiques de 2010 s'étant déversées le long de la Gendol, cette dernière a été remplie par près de 8 m de dépôts, dont le toit permet de définir un nouveau niveau topographique post-éruptif, permettant de quantifier le rythme d'incision lié aux lahars. Les mesures de terrain ont montré qu'à Kaliadem et Jambu (5-6 km du cratère), les dépôts pyroclastiques de l'éruption ont subi une incision de 17 m de janvier 2011 à juillet 2011, pour un élargissement de 26 m. On estime donc que sur la section de Kaliadem, longue de 1 km, le volume de dépôts emporté par les lahars est de 442 000 m³. Ce rythme est beaucoup plus élevé sur les dépôts pyroclastiques qu'en terrain volcanoclastique comme dans la Putih, et montre l'extrême sensibilité du stock pyroclastique situé en amont de la Gendol (Figure 43).

La rapide évacuation (< 6 mois) des tephras peu consolidés qui forment ce matériel a amené ensuite l'érosion du *bedrock*. Dans le cas de l'amont de la Gendol, à Kaliadem, celui-ci se situe à environ 10,4 m sous le toit des dépôts pyroclastiques. Le *bedrock*, composé de dépôts volcanoclastiques quaternaires consolidés en tufs cendreux (Wirakusumah *et al.*, 1989), est ainsi taillé sur plus de 6 m de profondeur, témoignant d'une très importante énergie des lahars sur le talus proximal.

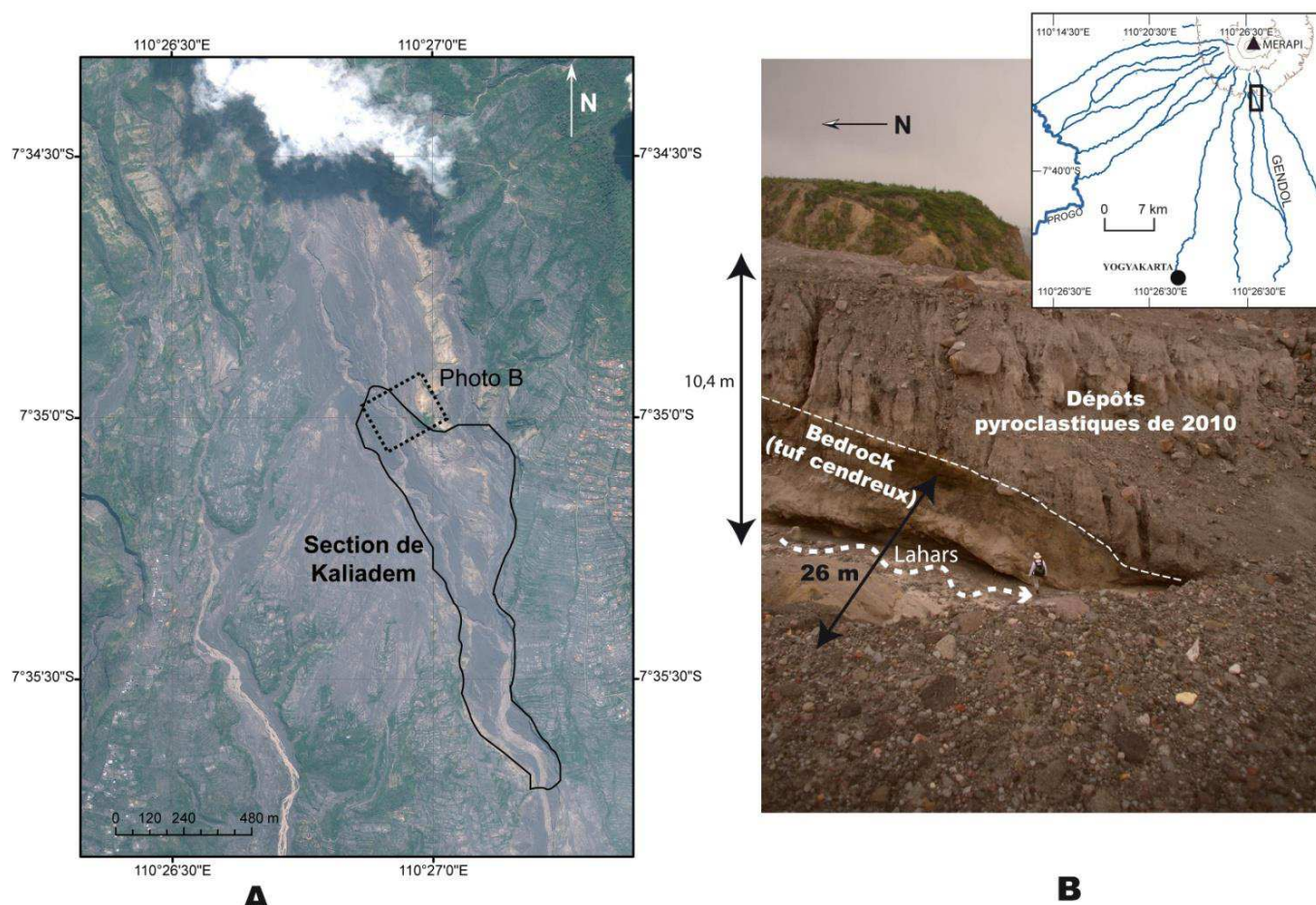


Figure 43 - L'incision par les lahars des dépôts pyroclastiques de 2010
(A : image GeoEye 2011 ; B : cliché E. de Bélizal, juillet 2011)

1.2 Érosion et sédimentation dans les rivières du talus distal

1.2.1 Le cas de la Opak à Panggung

Dans les villages Panggung et Teplok (14 km du cratère) le long de la Opak, la réponse géomorphologique du réseau hydrologique met en danger des centaines de personnes. Durant le XX^e siècle, aucun lahar n'a été signalé dans ces villages, qui se sont donc étendus jusqu'aux abords directs du petit chenal. La rivière n'est d'ailleurs pas identifiée comme corridor de lahars sur la carte « de risque » du Merapi (cf. chap. 1, Figure 12). Avant l'éruption de 2010, la Opak était une petite rivière de 1,5 à 2 m de profondeur et de 2 m de large où aucune évidence géomorphologique ne montrait l'occurrence historique récente de lahars (Figure 40) jusqu'à son confluent avec la rivière Gendol, 9 km plus en aval. Toutefois, à partir de novembre 2010 jusqu'en mai 2011, 17 lahars ont eu lieu. Le 30 décembre 2010, le pont de Panggung fut bouché par un lahar, dont les vagues successives se

déversèrent dans l'affluent qui rejoignait la Opak en aval des villages qu'il contournait par l'ouest. Rapidement comblé par l'accumulation des matériaux bloqués par le pont, ce cours d'eau fut contraint de se creuser un nouveau chemin vers la Opak juste en aval du pont de Panggung (Figure 44).

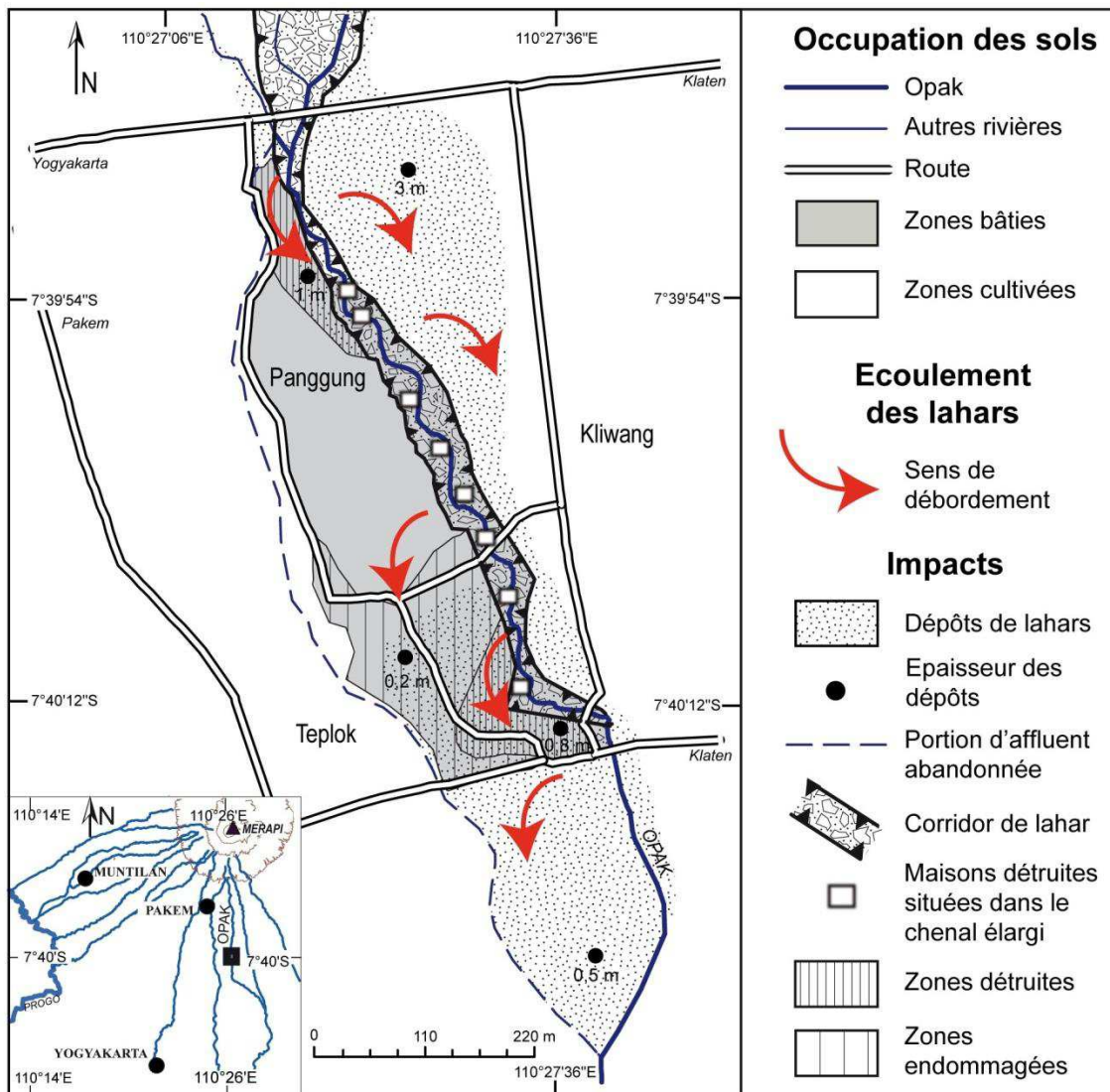


Figure 44 - L'élargissement du chenal de la Opak dans les villages de Panggung et Teplok
(d'après image Spot 5 2008 et données de terrain 2011) chenal élargi : corridor

Une portion de cet affluent qui longeait l'ouest des villages et qui permettait l'entretien de bassins à poissons fut dès lors abandonnée, le confluent se trouvant désormais au niveau du pont de Panggung, et non plus en aval de Teplok (Figure 44). Le 3 janvier 2011, un nouveau lahar provoqua une débâcle brutale du pont de Panggung, dont la vidange se répandit immédiatement dans les rizières et les champs de la rive orientale de la Opak (cf. *supra*, I. 2.2.2). À la fin de janvier 2011, le réajustement très rapide de la rivière a conduit à la formation d'un corridor large de 20 m et profond de 4 m que les lahars successifs n'ont cessé d'élargir vers l'ouest, et à l'intérieur duquel la Opak se frayait un lit à géométrie variable d'un jour à l'autre. Toute une partie des villages de Panggung et Teplok s'est retrouvée située brutalement dans ce nouveau corridor emprunté par les lahars (Figure 40 et Figure 44). Des digues ont été construites avec des dépôts provenant de la charge de fond de la rivière et des dépôts de lahars, consolidées par des sacs de sable, mais elles demeurent sans effet en cas de lahar intense. Ainsi, le 22 mars 2011, un front de lahar composé d'abondants débris végétaux a sapé la base des digues situées en rive concave de la petite sinuosité située juste en aval du pont de Panggung.

Celles-ci se sont effondrées, et une première pulsation du lahar a dévasté une partie du village où des profondeurs de boue entre 0,5 m et 1 m ont été mesurées. Le débit de pointe est survenu près de 20 min plus tard, évalué *in situ*, d'après la surface de la section mouillée et la vitesse moyenne de surface, à $Q = 245 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ au pont de Panggung. Le lahar est entré dans Teplok, guidé par le réseau des rues et des chemins, où des profondeurs de boue de 0,1 m à 1 m ont été mesurées. Deux ha ont été endommagés : cultures ensevelies, maisons partiellement détruites, perte de mobilier et de biens électroniques. Ce réajustement morphologique par élargissement de la partie aval de la Opak s'est fait en quelques mois, et témoigne de l'aspect particulièrement morphogène des lahars : formation et élargissement d'un corridor calibré par les lahars, et recomposition du réseau hydrographique à échelle locale.

1.2.2 Le cas de la Gendol à Plumbon : entre aggradation et incision

Sur le talus distal de la Gendol, au niveau de Plumbon, à 19 km du cratère, les impacts géomorphologiques des lahars n'ont pas eu des conséquences aussi délétères que dans la partie distale d'autres rivières comme la Putih ou la Opak. Cela vient d'abord de l'existence d'anciennes digues de béton hautes de 5 m bâties de part et d'autre de la surface habituellement recouverte par les lahars à Plumbon. Ces constructions délimitent ainsi le corridor de lahar de la Gendol, à l'intérieur duquel aucune habitation n'est construite, mais qui a été depuis plusieurs décennies dévolu aux cultures fruitières et potagères irriguées. À la différence de la Opak où les lahars n'ont pas eu lieu au XX^e siècle, la Gendol, plus fréquemment touchée, a été aménagée et le corridor de lahars y a été délimité dans sa partie distale.

On observe tout d'abord une période d'intense sédimentation, de janvier à mars 2011, avec des dépôts de plus de 3 m liés à quelques occurrences particulièrement énergiques, comme le lahar du 22 mars (Figure 45; cf. chap. 5). Cette phase d'aggradation s'accompagne d'une disparition rapide de la végétation entre janvier et février, puis par des changements réguliers du tracé du lit mineur, réajusté après chaque occurrence de lahar. Son tracé se fixe en avril 2011, au moment où la seconde phase, l'érosion, débute. Celle-ci est suffisante pour inciser les dépôts jusqu'au *bedrock*, composé de brèches volcanoclastiques, lui-même taillé sur 2 m en mai 2012, un an après le début de la phase d'érosion (mai 2012 ; Figure 45A et C). Ce brusque revirement morphologique, depuis la sédimentation abondante suivie par une incision puissante, n'a pas été observé ailleurs sur le talus distal du Merapi. Ce phénomène est lié à plusieurs facteurs, à la fois naturels et anthropiques, qui sont propres à la Gendol.

1. La recharge sédimentaire en matériel volcanoclastique a été insuffisante pendant la saison des pluies 2011-2012. Les occurrences de lahars ont été deux fois inférieures à celles de la mousson 2010-2011, vraisemblablement à cause d'une trop faible intensité pluviométrique (D. Sri Hadmoko, comm. orale) comparativement à la saison de Niña de 2010-2011. Ainsi, la dynamique de sédimentation n'a pas pu reprendre de manière effective.
2. Les travaux de voirie ont été particulièrement nombreux juste en amont du pont de Plumbon, d'où ont été prises les photographies (Figure 45A et B). L'eau qui passait sous le pont était auparavant chargée de matières en suspensions, et s'écoulait lentement sur une surface subhorizontale. L'évacuation progressive du matériel volcanoclastique juste en amont du pont a créé une petite pente qui a permis à l'eau de la rivière de couler plus rapidement, et de lui donner très certainement l'énergie nécessaire pour entamer le *bedrock* plus résistant que les dépôts de lahars. En outre, le rôle des extractions de sables et de blocs (chap. 7) a joué un rôle également en effectuant un tri artificiel des matériaux volcanoclastiques. La disparition des fractions les plus fines a pu augmenter la puissance érosive du cours d'eau.

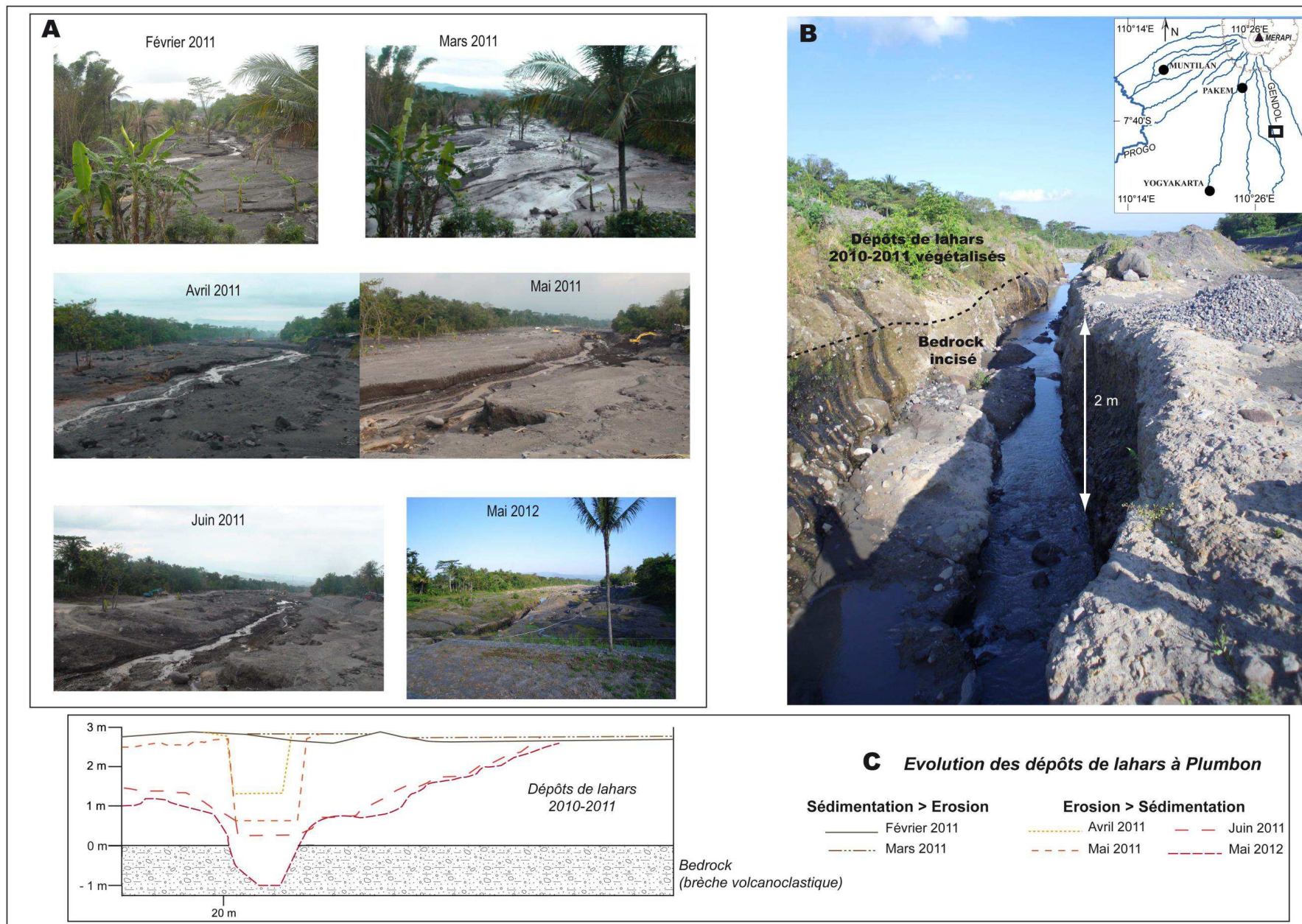


Figure 45 - Sédimentation et érosion sur le talus distal (Plumbon, Gendol). A : l'évolution du corridor de la Gendol à Plumbon ; B : le bedrock incisé ; C : évolution du profil du corridor (2011-2012), mesures au télémètre A et B: clichés E. de Bélizal, 2011 et 2012 (orientés vers le sud)

2. Les défluviations

Par « défluviation » est désigné le changement brutal du tracé d'une rivière. La puissance érosive des lahars leur permet en effet de se créer des chenaux d'écoulements rectilignes s'affranchissant des sinuosités du réseau hydrographiques (Pierson, 1995). Il s'agit de l'une des conséquences géomorphologiques les plus spectaculaires des lahars, à la fois par la rapidité du processus, mais aussi par les dégâts provoqués, quand bien même la dimension spatiale des défluviations demeure réduite à quelques centaines de mètres. Les deux cas de figure étudiés sont les deux événements de défluviations survenus sur le talus distal du Merapi (20 km depuis le cratère) en 2011, à l'origine de très importants dégâts (plusieurs centaines de maisons endommagées, voir chap. 4). Dans ces exemples, la morphologie de la rivière est marquée par (1) la formation d'un corridor de lahar par érosion des berges et (2) la création, en un seul événement, d'un second chenal, rectiligne, emprunté par les lahars.

2.1 Le cas de la Putih à Sirahan

Les lahars dans la vallée Putih ont commencé dès le 5 novembre 2010, pendant l'éruption, remobilisant les matériaux fins des retombées aériennes. Dix-huit lahars ont été recensés jusqu'au 3 janvier 2011. Situé à 20 km du cratère, Sirahan est une commune (*desa*) traversée par la Putih, dont le lit mineur était de dimensions modestes avant l'éruption, à peine 3 m de largeur pour 1,5 m de profondeur. Les lahars de novembre et décembre 2010 ont déposé plus de 5 m de dépôts volcanoclastiques au fond du lit de la rivière, qui s'est élargi de plus de 10 m, formant un véritable corridor s'ajustant sans cesse aux lahars qui l'empruntaient. Au début de janvier 2011, le lit de la rivière, artificiellement endigué par des levées de quelques mètres de haut, s'est donc trouvé en porte-à-faux au-dessus du niveau de base de la commune environnant par sa rapide aggradation. Le 9 janvier 2011, un lahar puissant de 4 m d'épaisseur maximale mais de vitesse inconnue s'est produit et a débordé dans de nombreux endroits en aval de la rivière Putih, et notamment à Sirahan (cf. *supra* I. 2.3.2). Profitant d'une sinuosité du chenal, le flux a rompu la digue et s'est accumulé dans les rizières, tandis qu'une autre partie a suivi la pente naturelle et a emprunté la route principale (Figure 46 et Figure 47). Celle-ci a été entièrement détruite par l'intensité du lahar, qui s'est littéralement creusé un nouveau chenal de 3,5 m de profondeur, rectiligne, au beau milieu des zones bâties jusqu'à ce qu'il retrouve le chenal de la Putih quelques centaines de mètres plus en aval. Le même processus de défluviations s'est produit à nouveau pendant la quasi-totalité des 25 lahars survenus depuis janvier 2011 jusqu'à la fin de la saison humide en mai, provoquant de graves dommages dans Sirahan, traversée par un chenal parallèle au lit naturel de la Putih lorsque la rivière débordait en cas de lahar. Un second chenal a même été relié temporairement à la rivière Blongkeng, transformant une rue en torrent. En conséquence, 254 maisons ont été endommagées, dont 37 entièrement détruites, et 30 ha de terres arables ont été ensevelis sous 3 m de dépôts dans la zone d'accumulation (Figure 47; voir chap. 4). À la fin de la saison humide 2010-2011, la rivière Putih s'écoule dans un vaste corridor de lahars d'une largeur de 30 m, sur un lit exhaussé de 7 m par rapport à son niveau originel, endigué par des levées de blocs, de graviers et de sables grossiers afin de protéger Sirahan des défluviations accidentelles. Celles-ci seront à craindre durant les saisons humides des années à venir : le nouveau lit de la Putih traversant l'ancienne route de Sirahan (Figure 46) peut être réactivé par un lahar de grande intensité (au moins 4 m de profondeur). Les défluviations sont donc causées par l'inadaptation de la forme du réseau hydrographique sur le talus distal du volcan : l'absence de berges suffisamment élevées, les faibles pentes et la sédimentation rapide provoquée par les premiers lahars peut conduire en quelques semaines à la formation brutale d'un nouveau chenal sur quelques centaines de mètres.



Figure 46 - Les marques de la défluviatation de la Putih à Sirahan : nouveau chenal et lit d'origine

Sur la partie gauche (septentrionale) de la photo, le chenal creusé au milieu de Sirahan par les défluviations des lahars de la Putih en 2011. L'incision par les 19 lahars survenus entre le 9 janvier et le 22 mars 2011 a creusé de 3,5 m ce nouveau chenal, en lieu et la place de la route principale de la commune. La photo est prise au confluent de ce nouveau chenal et du lit naturel de la Putih situé à droite de l'image (sud-est), en aval de la commune. Des travaux sont en cours pour tenter de boucher le chenal créé par les lahars, afin d'éviter de nouvelles défluviations

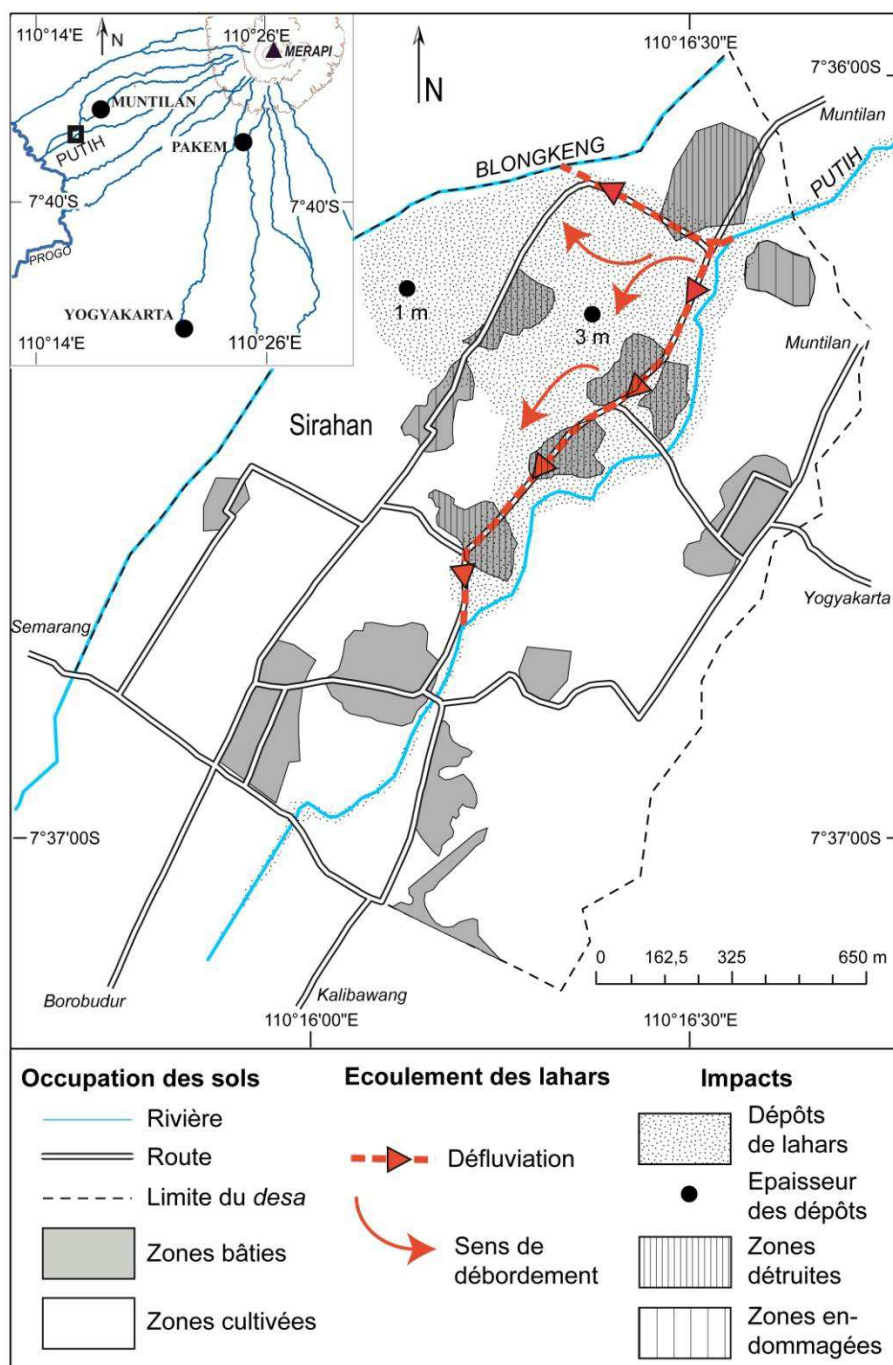


Figure 47 - La défluviation des lahars de la Putih à Sirahan
(d'après images Spot 5 2008, GeoEye 2011 et données de terrain 2011)

2.2 Le cas de la Gendol à Ngerdi

Un phénomène similaire s'est produit à Ngerdi, en aval de la commune Sindumartani, dans la partie aval de la Gendol qui, à la différence de Plumbon, n'est pas endiguée. La plupart des maisons endommagées par le lahar du 1^{er} mai 2011 étaient situées à proximité directe de la Gendol, dont le chenal principal était de dimensions modestes avant le début des lahars (3 m de large pour 1,5 m de profondeur). L'analyse de l'image satellite Spot 5 du 15 novembre 2011 montre une petite boucle du chenal vers l'est au niveau du village Kayen, qui n'a pas été suivie par le lahar du 1^{er} mai 2011 (Figure 48 et Figure 49). Celui-ci a traversé les rizières sur lesquelles il a déposé plus de 40 000 m² de dépôts

de quelques décimètres d'épaisseur, puis a directement frappé le village (*dusun*) de Ngerdi en y endommageant plus ou moins gravement 51 maisons. Au fur et à mesure que l'écoulement perdait en concentration sédimentaire, et retrouvait une dynamique plus torrentielle, il s'est creusé un lit à l'intérieur des nouveaux dépôts, large de 15 m et incisé sur moins d'1,5 m (Figure 49). Le lendemain, la Gendol était divisée en deux au niveau de la petite boucle de Kayen : une partie du flux empruntait l'ancien tracé de la rivière, tandis qu'une autre partie suivait le nouveau chenal qui traversait le village (Figure 48 et Figure 49), lequel se trouve désormais au cœur du corridor de lahar de la Gendol qui s'est formé au cours de la saison des pluies 2010-2011.

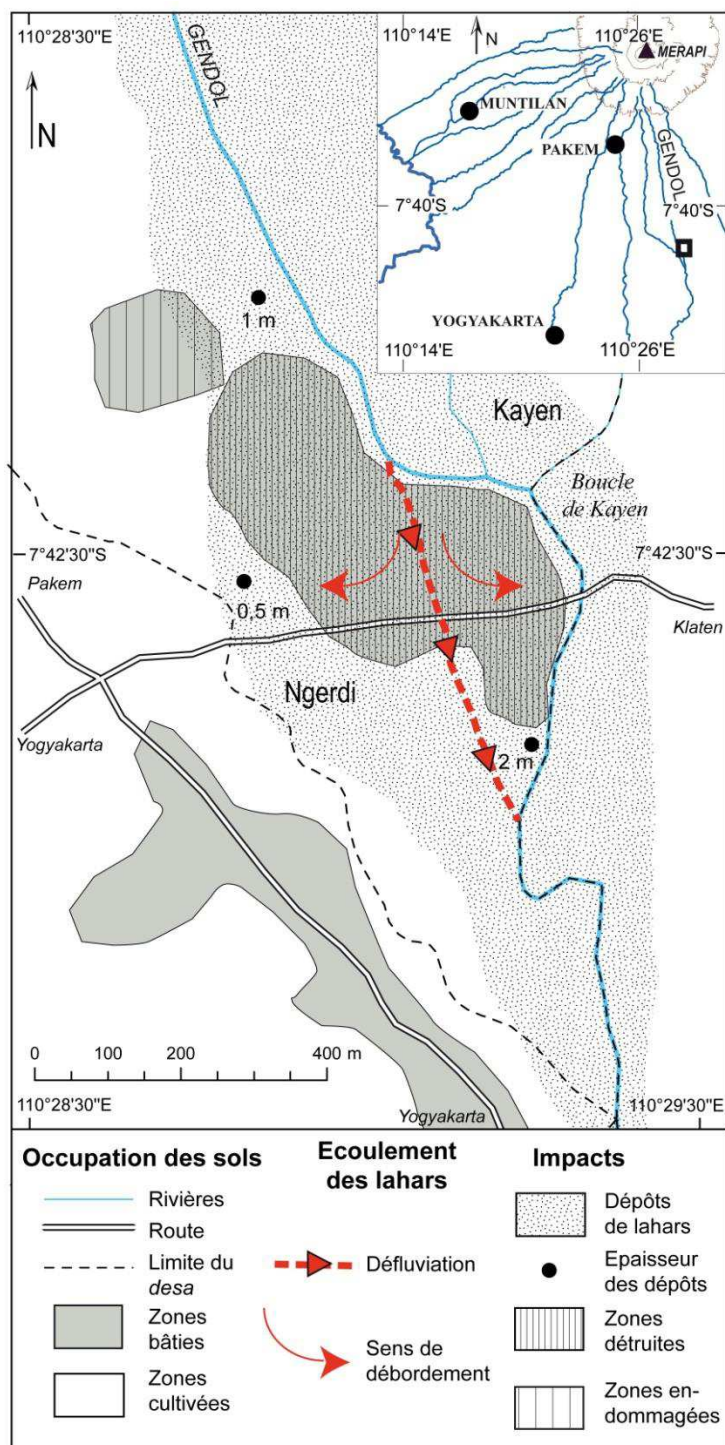


Figure 48 - La défluviation des lahars de la Gendol à Ngerdi (d'après image Spot 5 2008 et données de terrain 2011)

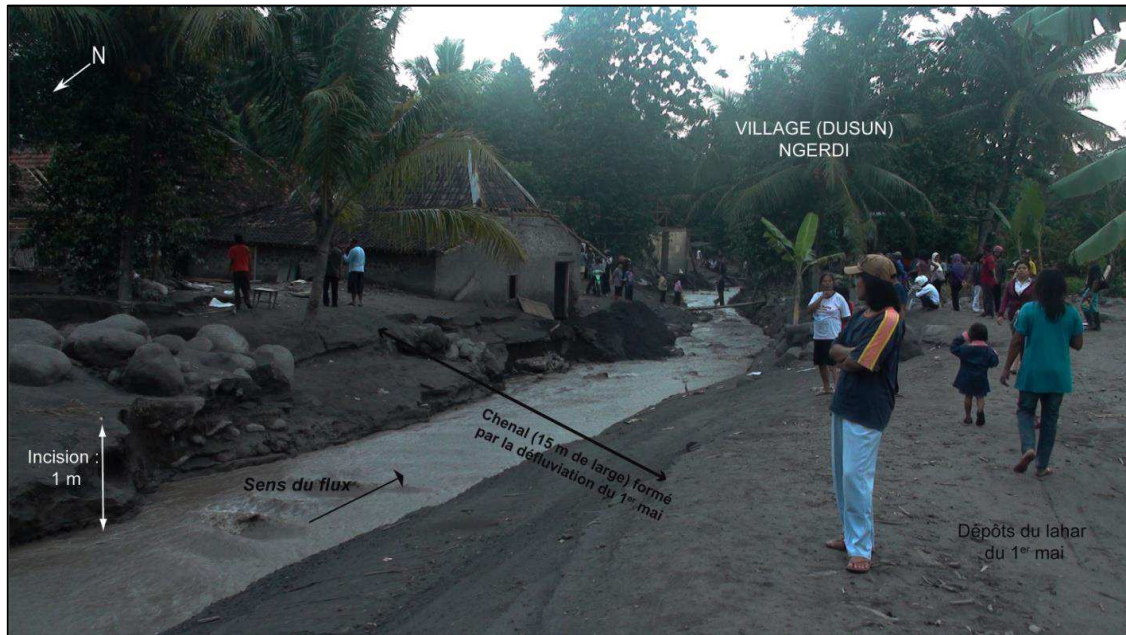


Figure 49 - La défluviation de la Gendol à Ngerdi : un nouveau chenal traverse le village après le passage du lahar (cliché E. de Bélizal, mai 2011)

2.3 Un risque de défluviation de la Putih vers la Batang ?

La rivière Batang n'a connu qu'un seul épisode de lahar juste après l'éruption, le 16 novembre 2010. Pourtant identifiée comme corridor majeur de lahars après l'éruption de 1931 avec 33 événements recensés (Schmidt, 1934 ; Voight *et al.*, 2000) ayant laissé des blocs de brèches volcanoclastiques au niveau du fleuve Progo, la Batang ne fait pas partie des vallées et rivières à surveiller. Sa partie proximale a en effet été entièrement comblée par les dépôts d'une coulée pyroclastique en 1961, rendant désormais peu probable le déclenchement en amont des lahars. L'étude comparée des images satellites Spot 5 2008, 2010 et GeoEye 2011, couplée aux observations de terrain, laisse toutefois apparaître un risque de défluviation qui pourrait s'avérer catastrophique si les lahars de la Putih venaient à se déverser dans la partie médiale sous-dimensionnée de la Batang (Figure 50).

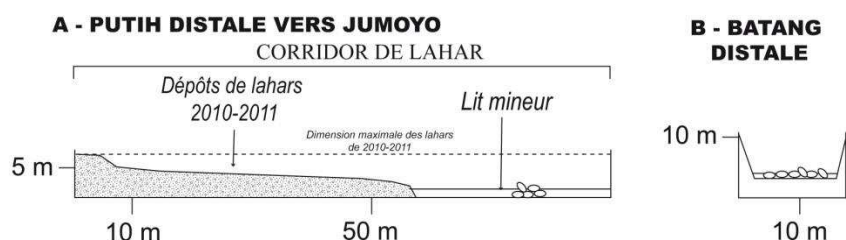


Figure 50 - Profils comparés de la Putih (A) et de la Batang (B) au niveau de Muntilan

Les lahars de la Putih peuvent atteindre des largeurs maximales de près de 90 m pour des profondeurs de plus de 5 m. Avec des dimensions réduites, la Batang n'est plus calibrée pour supporter le passage d'un éventuel lahar de grande intensité. La seule occurrence de lahar survenue dans la Batang après l'éruption de 2010 n'a laissé que de maigres dépôts dans le lit de la rivière. Une défluviation d'un lahar énergétique depuis la Putih vers la Batang provoquerait inmanquablement de très importants réajustements du réseau hydrographique qui menacent les habitations riveraines de cette rivière, regroupant près de 3000 personnes (recensement de 2010).

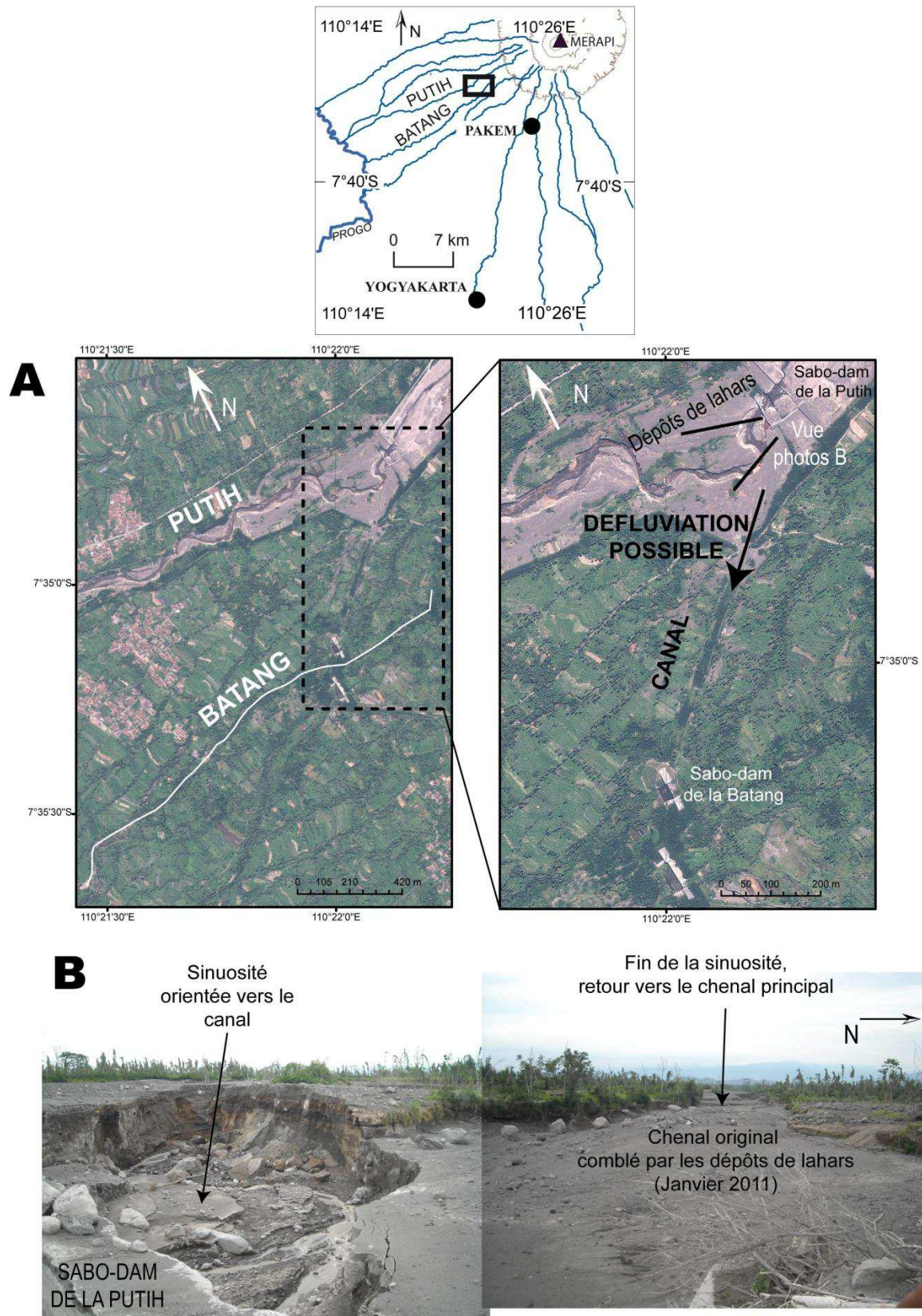


Figure 51 - Le risque de défluviation entre la Putih et la Batang
A : Image GeoEye (juin 2011). B : clichés E. de Bélizal (février 2011)

3. Les débordements ponctuels

3.1 Un processus en trois temps

Les débordements pendant un lahar se produisent généralement en deux ou trois temps. Une première pulsation concentrée en matériaux grossiers (blocs décimétriques) qui s'étend très largement sur l'interfluve avec un fort impact destructeur, suffisant pour emporter des levées, par exemple. Cette première vague peut être alimentée par de nombreux épisodes secondaires, associés à l'écoulement turbulent du lahar, et peuvent déposer jusqu'à 2 m de matériel volcanoclastique en un même épisode (Figure 53). Toutefois, lorsque le débit se réduit, les pulsations deviennent plus espacées dans le temps, et sont surtout moins concentrées. Le débordement traduit donc une triple dynamique morphogène : (1) incision et étalement lors du front et/ou du pic de débit (correspondant à la concentration sédimentaire maximale de l'écoulement), (2) déposition de ces matériaux, et (3) incision quasi-instantanée de ces nouveaux dépôts par les pulsations plus riches en eau de fin d'écoulement (Figure 53).

Ces débordements ponctuels souvent brefs dans le temps et restreints spatialement (quelques dizaines de mètres), à la différence des exemples abordés plus haut, sont le processus le plus fréquent sur l'ensemble des parties aval des vallées, lorsque les chenaux ne circulent plus dans des fonds de vallée, mais pratiquement à fleur de sol. À la moindre augmentation du débit provoquée par un lahar, l'ensevelissement des terrains adjacents est inévitable. De nombreux villages, notamment le long de la Gendol sur sa partie distale non endiguée, ont été endommagés par des débordements ponctuels du flux (Figure 53) et ont été recouverts par quelques décimètres de boue, immédiatement incisés par les écoulements torrentiels moins concentrés de la fin de l'aléa.



Figure 53 - Dégâts provoqués par un débordement ponctuel du lahar du 19 mars 2011 dans la Gendol à Jaranan, 5 km en amont de Ngerdi et 2 km en amont de Plumbon (cliché E. de Bélizal, mars 2011).

Après une première vague qui a notamment transporté des blocs qui ont dévasté les constructions (premier plan), s'ensuivirent des pulsations moins concentrées qui ont incisé sur 105 cm ces premiers dépôts. Les silhouettes au second plan donnent l'échelle.

3.2 Le cas de la Pabelan à Tamanagung : débordement sur une terrasse

Dans le cas de la Pabelan à Tamanagung (20 km du cratère), une partie du village a été dévastée en mars 2011 en même temps qu'une partie des ponts jumeaux de la quatre-voie Yogyakarta-Semarang était emportée (Figure 54). À Tamanagung, une dizaine de maisons étaient construites sur une ancienne terrasse surélevée de 5 m au-dessus du fond de vallée drainé par la Pabelan, large de 47 m et incisé de 21 m, correspondant au seul exemple de corridor de lahar toujours visible sur le talus distal avant l'éruption de 2010. Le lahar du 30 mars 2011, nourri par la rencontre de lahars survenus dans plusieurs affluents de la Pabelan en amont (Trising et Senowo notamment), contraint par les sinuosités de la vallée, a été dévié directement vers la terrasse qu'il a recouvert sur près de 2 m, détruisant les maisons (Figure 54). Le débordement a eu lieu pendant le débit de pointe du lahar, évalué à plus de $1800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ au niveau des ponts jumeaux (section mouillée évaluée à 490 m^2 , pour une vitesse de surface maximale de $3,7 \text{ m/s}$, voir *supra* I. 2.1.3).

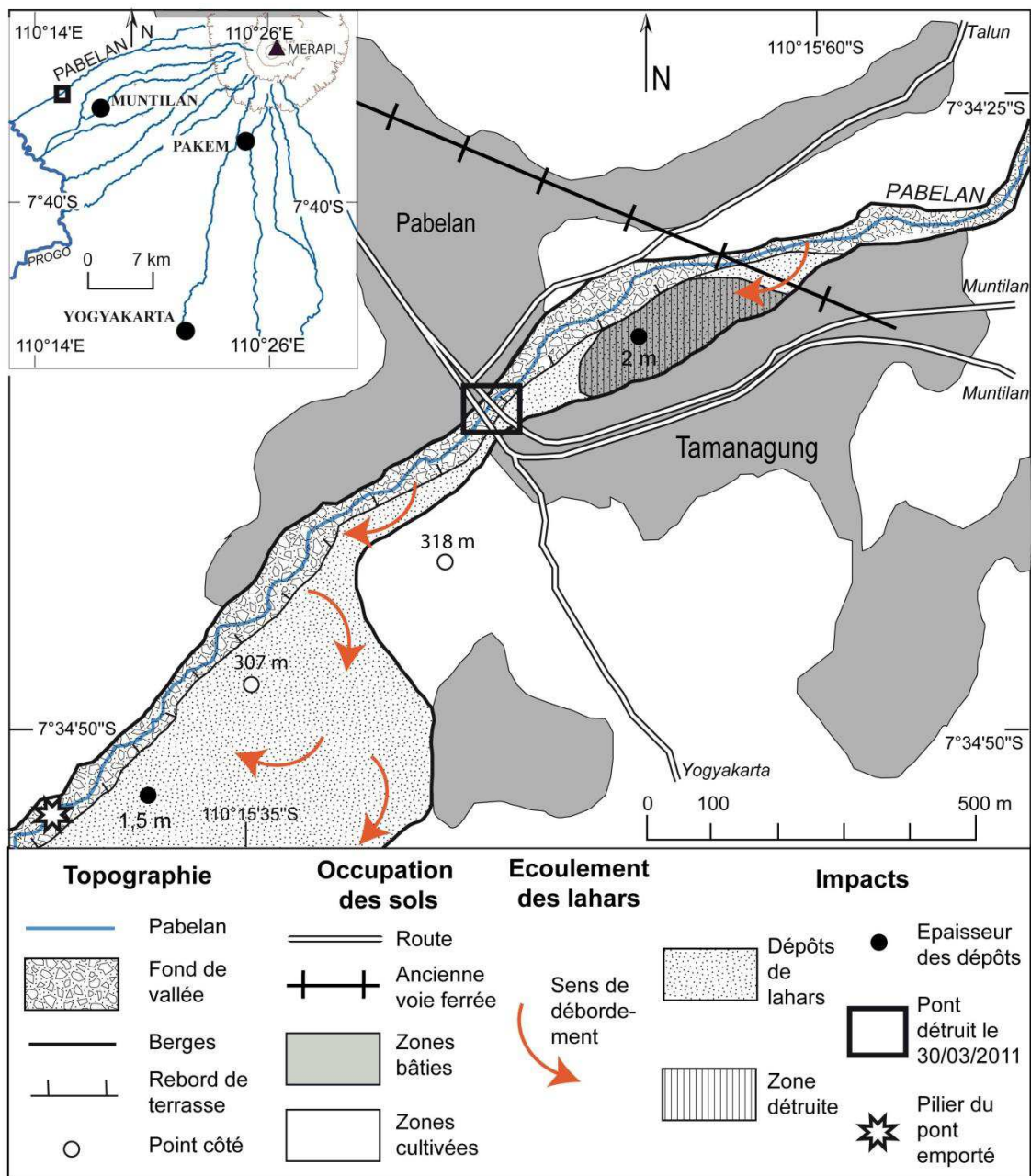


Figure 54 - L'inondation du village de Tamanagung
(d'après image Spot 5 2008 et données de terrain 2011)

3.3 Le cas de la Code à Yogyakarta : des aléas en milieu urbain

La Code est le prolongement de la Boyong, et a été au moins trois fois traversée par des lahars (cf. *supra* I. 2.1.1). La situation de la Code est singulière, car c'est la seule rivière du Merapi à s'écouler en milieu urbain dense, puisqu'elle traverse le centre ville de Yogyakarta avant de rejoindre le fleuve Opak au sud de Java. L'occurrence des lahars dans la Code pose donc d'une manière particulière la question des risques, puisque les densités de population y sont particulièrement élevées, et que le niveau de vie des populations urbaines dans les quartiers proches de la Code est généralement assez bas (Lavigne, 1999). Tout le long de la rivière, ce sont 3125 maisons situées à moins de 100 m de la rivière qui sont exposées aux lahars (Hadmoko *et al.*, 2012), dont 344 à moins de 25 m du lit mineur. Il s'agit d'habitations localisées sur le plus bas des trois niveaux de terrasses au fond desquels coule la Code. Le danger provient essentiellement du tracé de la rivière qui est très fortement canalisée : les sinuosités parfois méandreuses de la Code favorisent les effets de réverbération du flux contre une berge et les débordements associés en cas de lahars (Figure 55).

Si les lahars qui ont atteint la Code en novembre 2010, mars et mai 2011 étaient des écoulements hyperconcentrés ne transportant pas de blocs capables de destructions massives comme à Tamanagung, la boue qu'ils ont laissée a endommagé de nombreuses maisons. Dans le cas du 29 novembre 2010, une dizaine de maisons ont été inondées par le lahar, et 2 sévèrement endommagées dans le quartier de Cokrodiningrat (Figure 55A), situé au cœur de la ville à 28 km du cratère en rive droite de la rivière. Cette zone a été particulièrement touchée lors des occurrences suivantes, notamment le 19 mars 2011 et le 1^{er} mai 2011. La forte sinuosité de la rivière favorise les avulsions qui sont ensuite canalisées et accélérées par le réseau de rues étroites (*gang*). Les risques de débordements sont également fréquents au niveau de la sinuosité de la Code à Cokrodiningratan et plus en aval à Gondomanan (Figure 55B). Ces sites sont localisés sur des lobes de rive convexe, inondés par des débordements dus à la canalisation du flux.

En réponse aux lahars particulièrement fréquents et étendus après l'éruption de 2010, les rivières ont subi des réajustements qui ont été étudiés à échelle locale à travers des exemples pris sur l'ensemble du volcan, dans presque tous les bassins versants, et qui traduisent, notamment, la réactivation et la formation des corridors de lahars. Sur les talus proximal et médial, les larges vallées correspondant à des corridors de lahars historiques, ont été incisées et élargies (exemples de la Senowo à Mangunsuko, de la Putih à Jurangjero, de la Gendol à Kaliadem). Sur le talus distal où les lahars historiques ont été moins fréquents et où leurs évidences morphologiques étaient peu visibles voire effacées (Opak), les rivières ont subi d'importants changements liés à la formation de corridors de lahars (exemple de la Opak à Panggung et de la Gendol à Plumbon). Les défluviations ont été étudiées sur le talus distal à Sirahan (Putih) et à Ngerdi (Gendol), et un risque de défluviations potentielle sur le talus médial entre la Putih et la Batang a été argumenté. Il s'agit de processus qui ne font pas qu'élargir le chenal, mais qui le dédoublent par un circuit parallèle rectiligne, de quelques centaines de mètres, pouvant circuler droit dans les villages riverains. Enfin, les débordements ponctuels ont été caractérisés à l'aide de l'exemple de la Pabelan à Tamanagung, et de la Boyong-Code à Yogyakarta.

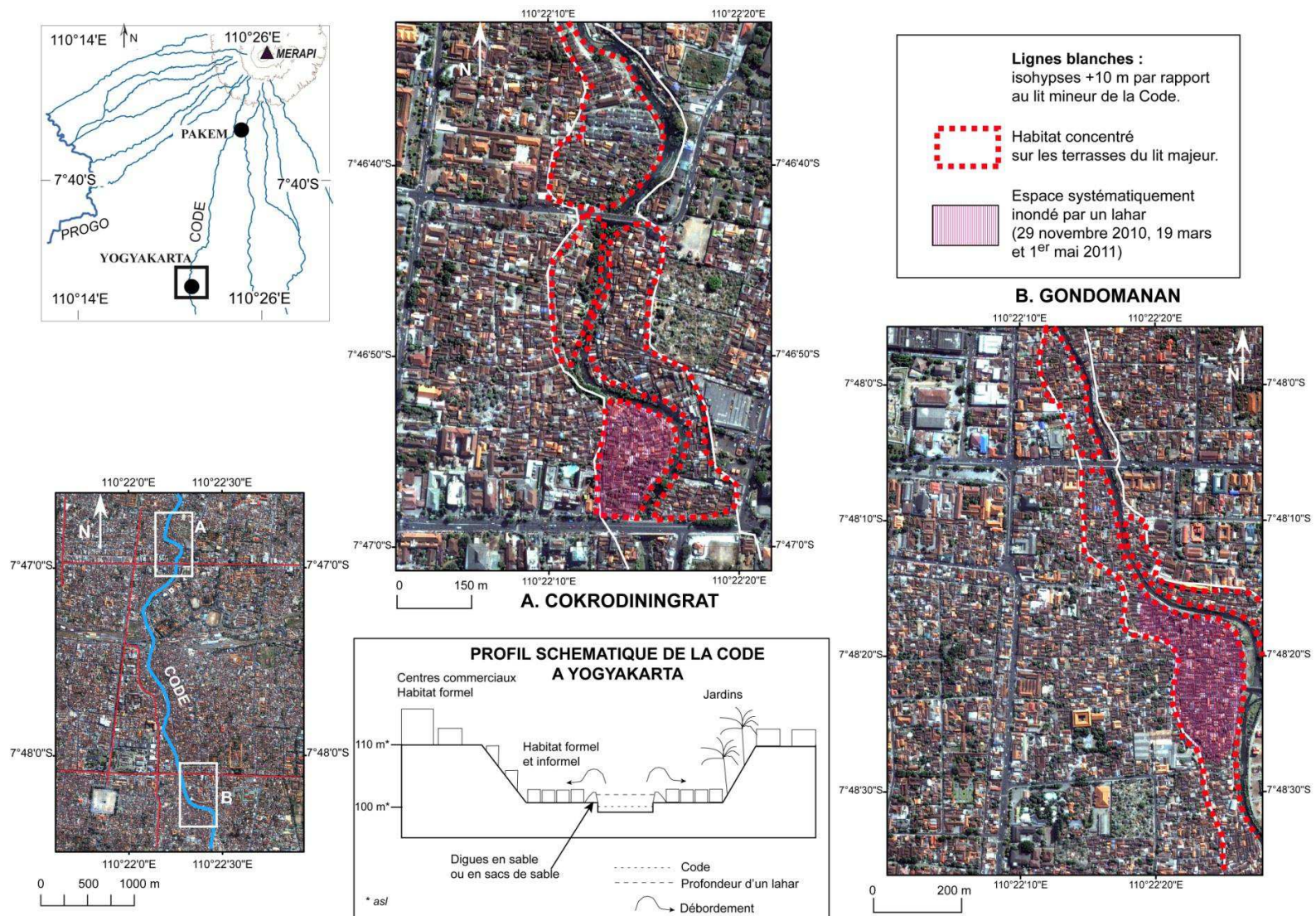


Figure 55 - La Code à Yogyakarta : sinuosités, zones exposées, zones inondées et type d'habitat (image Quickbird, 2006). Le centre historique, ou *keraton*, est le carré blanc visible sur l'image de localisation, à l'ouest de l'encart « B ».

L'objectif du troisième chapitre était de présenter la fréquence et la distribution spatiale des lahars survenus après l'éruption de 2010, ainsi que leurs impacts sur le réseau hydrographique. Les principales conclusions de ces résultats sont les suivantes :

- (1) Les lahars ont été particulièrement nombreux, avec 282 événements enregistrés entre le 27 octobre 2010 et le 25 janvier 2012. Durant chaque semaine de saison humide, 4 à 6 lahars pouvaient se produire.
- (2) La répartition spatiale des lahars a été très vaste. Ils se sont écoulés dans la quasi-totalité des rivières situées sous le cône actif du Merapi, du nord-ouest au sud-est. Cette augmentation du nombre de bassins-versants laharigène est due en partie à la dynamique explosive de l'éruption de 2010, qui a déposé du matériel pyroclastique à la fois sur les versants occidentaux et méridionaux du volcan. Les pluies, également, se sont avérées abondantes, avec des intensités en mm/h parfois très élevées.
- (3) Malgré l'absence d'un système de détection systématique, quelques mesures ponctuelles ont pu être réalisées et montrent des débits moyens de lahars oscillant autour de $Q = 250$ à $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ sur le talus distal. En revanche, les enquêtes et mesures de terrain ont montré également l'occurrence d'événements d'intensité plus grande ($Q > 1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) qui ont pu être renseignés. Le rôle des ponts et des barrages dans la variabilité de l'intensité des lahars a également été quantifiée et expliquée à l'aide de deux exemples sur la Opak et la Kuning.
- (4) La réponse du réseau hydrographique à cette forte fréquence de lahars a été étudiée à l'aide d'exemples pris sur l'ensemble du volcan. La plupart des rivières du volcan ont été investiguées à grande échelle pour permettre au lecteur de mieux saisir l'ampleur et la variabilité des changements très rapides que les lahars ont provoqué, notamment sur le talus distal du volcan. La dynamique de création de corridors de lahars (élargissements de chenaux, incision, sédimentation) associée à des défluviations et à des débordements a été présentée, expliquée et quantifiée. Les exemples abordés séparément dans la seconde rubrique du chapitre ne doivent toutefois pas laisser supposer un cloisonnement de ces processus, qui peuvent être bien souvent synchrones à un même endroit (l'élargissement du chenal de la Opak à Panggung s'est accompagné de débordements sur la rive orientale également). Leurs conséquences, toutefois, ne jouent pas sur la même échelle de temps. Les défluviations et élargissements de chenaux provoquent des transformations durables du réseau hydrographique que seul le génie civil peut résorber à grands renforts de travaux de voirie. Enfin, les débordements ponctuels désignent des processus plus immédiats, plus fréquents, aux conséquences moins visibles sur la forme du réseau hydrographique, mais tout aussi dommageables pour les populations riveraines. Les lahars constituent bien un agent morphogène important au Merapi : ils effectuent non seulement le transfert du matériel depuis le talus proximal vers le talus distal, et ce faisant forment un type d'espace particulier, les corridors de lahars, larges de plusieurs dizaines de mètres.

Ces changements morphologiques du réseau hydrographique ne sont pas sans impacts pour les populations riveraines. Les dégâts liés à la formation des corridors de lahars sont cartographiés et évalués dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 – Espaces menacés, impacts socioéconomiques et gestion du risque

« Les personnes habitant sur les parties distales d'un édifice volcanique ne se sentent pas menacés par les lahars, dont ils ignorent d'ailleurs la puissance destructrice »
(J.W. Vallance, 2000).

La remobilisation des dépôts pyroclastiques de l'éruption de 2010 par les pluies de mousson ont entraîné des lahars sur la quasi-totalité des bassins-versants du nord-ouest au sud-est du Merapi. Certaines rivières comme la Putih, la Opak ou la Gendol ont subi plusieurs dizaines d'événements en quelques semaines seulement. Les lahars se sont étendus jusque sur le talus distal du volcan, qui n'avait pas été touché depuis au moins une quarantaine d'années, et y ont formé des corridors de lahars, par élargissement et incision des chenaux, associés à des défluviations et à des débordements ponctuels. Les transformations géomorphologiques du réseau hydrographique menacent directement la sécurité des populations et de leurs habitations, qui occupent densément les abords de rivières redimensionnées et transformées en corridors de lahars. Ce contexte morphodynamique, associé à la forte densité de population au Merapi (cf. chap. 1, I.2.1), soulève la question des risques liés aux lahars et à leur gestion.

Quand bien même l'éruption est terminée, la situation d'urgence demeure bien présente puisqu'aux aléas éruptifs succèdent les aléas post-éruptifs, sur un espace et sur une temporalité plus vastes. Les espaces du risque, localisés en fonction de leur proximité avec le cratère pendant une éruption, doivent être désormais définis selon leur proximité par rapport aux nombreuses rivières où les lahars sont les plus probables. Après l'éruption de 2010, le danger n'est pas près du sommet, mais sur le talus distal du volcan.

L'objectif de ce chapitre 4 est d'exposer des résultats concernant :

- (1) Le risque lié aux lahars, alimenté par des réflexions sur les différents types d'espaces exposés aux lahars, sur la vulnérabilité des communautés du Merapi, et sur la connaissance de l'aléa et la perception des risques.
- (2) Les dommages provoqués par les lahars : typologie, nature, quantification et bilan.
- (3) La gestion de l'aléa, combinant à la fois les efforts des autorités administratives et scientifiques pour limiter les risques et la manière dont s'organisent les communautés locales pour faire face aux aléas.

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre s'appuie sur une revue de la littérature (vulnérabilité au Merapi), sur des rapports fournis par les administrations des villages touchés, sur des mesures de terrain, et sur des enquêtes réalisées auprès des acteurs et populations locales, dont un questionnaire systématique de perception du risque et de connaissance de l'aléa lahar auquel a répondu un échantillon de 625 personnes.

I. LES LAHARS REPRÉSENTENT-ILS UN RISQUE ?

Les lahars s'avèrent particulièrement morphogènes, et sont à l'origine de processus variés, identifiés au chapitre 3, menaçant inégalement la sécurité des populations riveraines. L'objectif de cette rubrique est de proposer un aperçu des différents espaces de danger lié aux lahars autour du Merapi après l'éruption de 2010. La vulnérabilité, établie d'après les observations de terrain et la littérature scientifique consacrée au Merapi, est discutée, et la perception de l'aléa est détaillée à l'aide des résultats d'un questionnaire.

1. Les espaces menacés et l'exposition des habitants

Le chapitre 3 a montré que les occurrences de lahars ont été très nombreuses autour du Merapi, avec 282 lahars entre octobre 2010 et janvier 2012. La fréquence demeure inégale selon les rivières : sur les 17 rivières qui ont été traversées par des lahars, seules 8 l'ont été plus de 15 fois. Ainsi des cours d'eau comme la Trising, la Woro, la Lamat, ou la Blongkeng avec des fréquences d'occurrences $F < 3\%$ sont beaucoup moins susceptibles à l'aléa que la Putih ($F = 19,5\%$), la Boyong ($F = 10,6\%$) ou la Gendol ($F = 10,3\%$) ainsi que la Ladon ($F = 10,3\%$). Cette analyse de fréquences statistiques donne un premier aperçu des rivières où les lahars sont les plus probables, et nécessitent une surveillance accrue.

1.1 Des zones faiblement menacées en amont des rivières

Sur le talus proximal du volcan, à la base du cône actif, les rivières sont encaissées dans des vallées aux parois subverticales pouvant atteindre plus de 40 m de hauteur (Apu, Gendol, Boyong). Le fond de vallée est large d'au moins 60 à 70 m, parfois plus de 100 m, notamment dans la Senowo, la Putih, la Bebung, la Boyong, la Gendol ou la Woro. Ces grandes dimensions rendent impossibles les défluviations ou les débordements liés aux lahars. Les seuls éléments susceptibles d'être directement frappés par les lahars sont les infrastructures bâties en travers des vallées, comme les ponts et les barrages à sédiments (*sabo-dams*), conçus pour justement briser l'énergie des lahars. En revanche, les villages situés sur les interfluves sont épargnés par les effets dévastateurs des lahars, même s'ils en subissent les effets indirects comme les effondrements liés aux sapements de berges. De fait, les *desa* (communes) dont le territoire s'étend sur le talus proximal apparaissent faiblement menacés par les lahars (Figure 56), à part quelques communes qui ont été plus fortement touchées par les reculs de berge (d'après relevés de terrain). Ces derniers sont presque tous situés dans le sous-bassin versant Pabelan. Dans le cas du versant méridional, seul l'amont de la Boyong est soumis à ce type de dynamique, avec un recul de 3 m mesuré à Turgo, sur le talus proximal.

Le talus médial est également globalement à l'abri des débordements liés aux lahars, puisque les rivières y coulent encore dans des vallées suffisamment encaissées pour épargner les villages bâtis sur les interfluves. En outre, certaines communes du flanc sud du volcan ont été balayées par les déferlantes de l'éruption de 2010 (en amont de la Kuning, de la Opak et de la Gendol), et n'étaient pas encore reconstruites pendant la saison des pluies 2010-2011, ce qui limite considérablement les risques de catastrophe dans le cas très hypothétique où un lahar serait suffisamment puissant pour déborder. Les rivières dont la partie médiale est dangereuse sont notamment la Gendol et la Opak. Des dégâts importants y ont été recensés (Figure 56), car la pente de la vallée diminue, ainsi que la hauteur des

berges (< 5 m). Des conditions similaires ont été observées dans la partie médiale des rivières Krasak, Bebung, et Batang (Figure 56). Dans ce dernier cas, le risque de défluviation depuis la Putih (cf. chap. 3) est un élément supplémentaire de danger ; toutefois, aucun dommage n'a été signalé dans les communes riveraines de ces rivières pendant la saison des pluies 2010-2011. Les risques sur le talus proximal sont donc réduits, de par la faible emprise des impacts de l'aléa sur la population. Leurs impacts en revanche, sont beaucoup plus marqués en aval (cf. chap. 3).

1.2 Un risque maximal sur le talus distal

1.2.1 **Des enjeux élevés**

On compte près de 38 communes (*desa*) situés à moins de 300 m ou traversées par une rivière autour du Merapi (Figure 56). Dans le seul district de Magelang, près de 120 000 personnes sont potentiellement menacées par les lahars. Sur le versant sud du Merapi, ce chiffre peut être triplé voire quadruplé en raison de la présence de l'agglomération de Yogyakarta, laquelle a déjà été frappée par les lahars (Figure 56). Les enjeux du versant méridional sont ainsi particulièrement élevés : présence d'une agglomération de près d'un million d'habitants, avec un habitat dense, particulièrement sur les terrasses de la Code, exposées aux lahars ; présence d'un complexe touristique de *prang* hindouistes du IX^e siècle sur les rives du fleuve Opak. Les dangers auxquels ces personnes et ces biens sont exposés sont des défluviations et des débordements, qui risquent de détruire et d'ensevelir habitations et infrastructures.

1.2.2 **Des populations vulnérables**

- **En milieu rural : l'exemple de Sirahan**

Les causes profondes de la vulnérabilité dans les milieux ruraux du Merapi sont un sujet d'étude particulièrement vaste. On se référera aux travaux de Lavigne *et al.* (2008), Utami (2008), Texier *et al.* (2009) et Donovan (2009) pour une investigation poussée des causes de vulnérabilité sur le Merapi. Celle-ci est liée, avant tout, à de fortes contraintes, notamment économiques : les habitants sont dépendants des ressources de leur territoire (*livelihood*) puisqu'ils n'en possèdent pas d'autres : champs, bétail, maisons et possessions matérielles sont la seule marge de manœuvre économique de populations qui, bien souvent, ne possèdent ni épargne ni assurance (Lavigne *et al.*, 2008 ; Texier *et al.*, 2009). Perdre ces biens, c'est ne plus rien avoir. L'exemple donné ci-après illustre cet argument.

La commune de Sirahan, sur le talus distal, a été marquée par des destructions de grande ampleur dès janvier 2011 à cause d'un processus de défluviation qui a dédoublé le lit de la Putih dans un vaste corridor de lahar (cf. chap. 3). La commune compte 3476 habitants sur un territoire de 2,4 km², d'où une densité de population moyenne de 1450 hab./km², ce qui est légèrement au-dessus de la moyenne dans les campagnes du centre de Java (950 hab./km², De Koninck, 2005) mais correspond presque au double de la valeur l'on peut calculer pour le Merapi d'après les données du recensement 2010 (800 hab./m²).

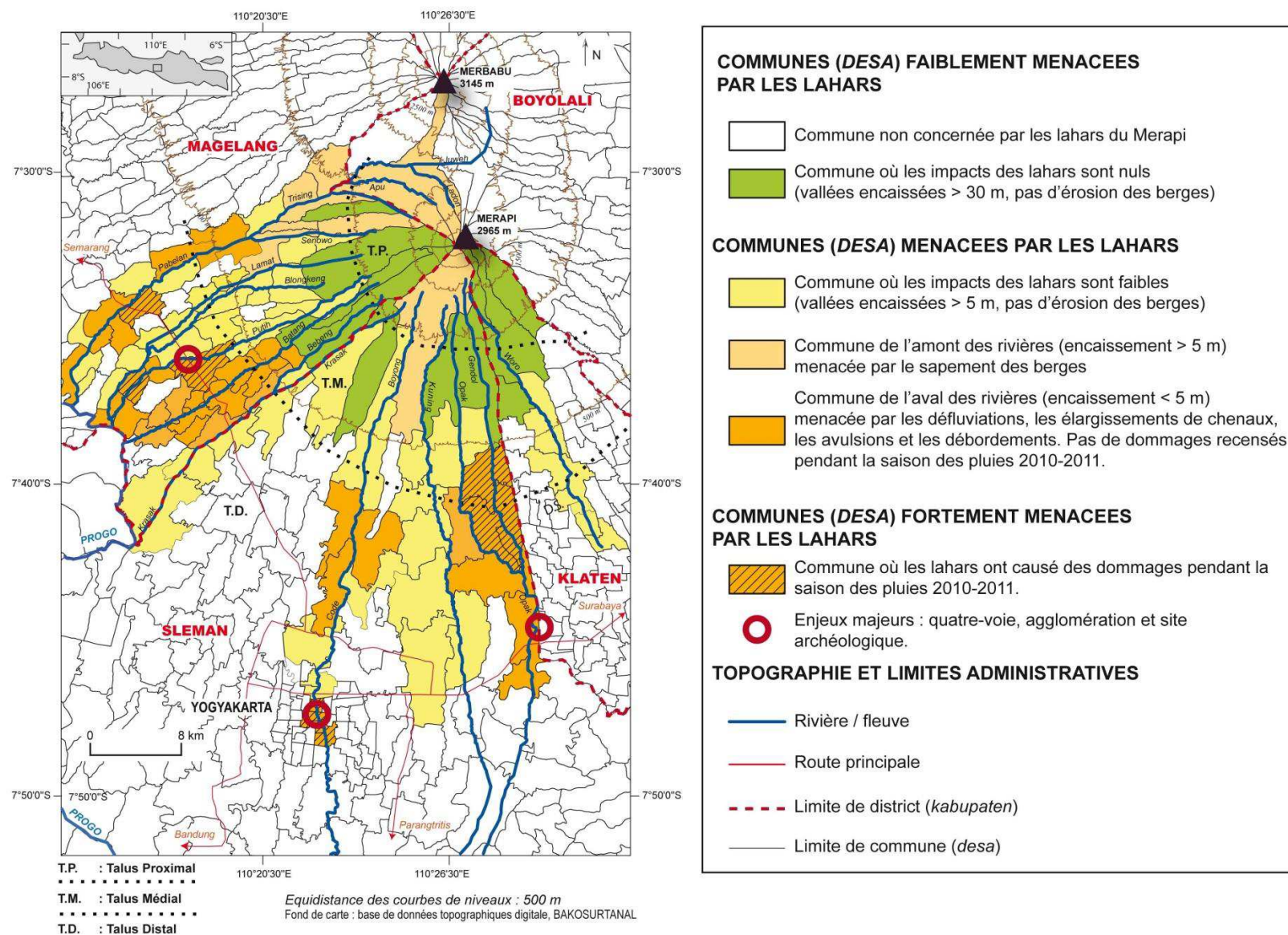


Figure 56 - Les communes du Merapi face à la menace des lahars

D'après un entretien avec le maire Pak Muryono, la majeure partie des habitants (> 60%) sont agriculteurs et ne possèdent rien d'autre que leur maison. Les plus aisés d'entre eux représentent une faible proportion et regroupent de rares propriétaires terriens (2%) ; la plupart travaillent en effet comme métayers, voire comme saisonniers. La quasi-totalité des maisons détruites par les lahars survenus depuis 9 janvier n'ont pas été reconstruites, car leurs habitants n'ont pas les moyens d'effectuer des réparations.

- **En milieu urbain : l'exemple de Yogyakarta**

L'étude de la vulnérabilité urbaine à Yogyakarta mériterait une thèse à elle seule, tant le tissu urbain de la ville est complexe. Il est le révélateur d'une ancienne histoire remontant aux royaumes indianisés de l'époque médiévale (Sanjaya, Salendra), puis au royaume javanais de Mataram dont Yogyakarta était la capitale insoumise au joug néerlandais (cf. chap. 1, I.2.1). La morphologie urbaine reprend la forme des *mandala* étudiés en Asie du Sud-est notamment par G. Coédès (1964), M. Pain (1998) ou M. Bruneau (2005), suivant le modèle d'un palais central, appelé ici le *keraton* (Figure 55), autour duquel sont aménagés de manière concentrique différents cercles périphériques, les plus proches du palais étant ceux de l'aristocratie, les plus lointains ceux des métayers. On y trouve également les héritages urbains de la période coloniale, avec un quartier central possédant une église, une poste et une forteresse ainsi qu'une gare ferroviaire qui ne se surimposent qu'imparfaitement au centre historique du *keraton*. Enfin, Yogyakarta possède également une logique urbanistique javanaise reposant sur une géomancie d'équilibre entre deux entités naturelles opposées et inégalement craintes : le Merapi au nord, territoire du feu infernal, et l'Océan Indien au sud, royaume des profondeurs de Loro Kidul, déesse de la mer avec laquelle le sultan de Yogyakarta a fait (et fait toujours) alliance. Le *keraton*, le cœur de Yogyakarta, est situé à l'exact milieu du segment mystique reliant l'océan au cratère du Merapi (Lavigne *et al.*, 2008). Dans ce dernier, un royaume d'esprits correspondant à un double spirituel et mystique de la cour du *keraton* est supposé exister, et déclencherait notamment les éruptions du volcan en réponse à des abus perpétrés au *keraton* (Dove, 2007, 2010). C'est sur ce socle de traditions solidement ancrées dans l'imaginaire collectif et dans la morphologie urbaine que s'est développée Yogyakarta. La compréhension de cette dimension historique et culturelle demeure nécessaire pour comprendre comment les espaces urbains fonctionnent : ils sont inclus dans un territoire plus vaste, englobant notamment le Merapi et ses dangers, et qui semble perçu par les populations qui y vivent. La ville appartient au domaine du Merapi, et la rivière Code qui la traverse figure ce lien matériel reliant la ville au volcan.

Un premier chantier d'étude de la vulnérabilité urbaine, mené par V. Horny dans le cadre d'un master 1 de géographie à Paris 1 (2012), a justement bien montré que les riverains de la rivière Code avaient pleinement conscience des dangers susceptibles de les menacer ; les chiffres et données suivants sont extraits de son étude. Le questionnaire réalisé auprès des habitants de la Code, notamment à Jogoyduan et Gondomanan à Yogyakarta (Figure 55, chap. 3) montre avant tout qu'ils sont conscients d'habiter sur un espace directement relié aux dynamiques du Merapi : 87% d'entre eux estiment que les lahars sont une menace grave dans leur vie de tous les jours. D'ailleurs, 46% des personnes ont répondu avoir déjà subi une inondation de plus d'1 m chez eux à cause des lahars. La forme de l'habitat, constitué de maisons formelles ou informelles bâties juste à côté de la rivière, dans une zone propice aux aléas, suggère une certaine marginalité des populations qui y habitent. Cette dimension marginale, assez peu présente dans les espaces ruraux finalement relativement homogènes du Merapi, prend un sens particulier à Yogyakarta : ce sont les ségrégations socio-spatiales du tissu urbain qui créent des espaces à risque, en contraignant des populations pauvres (marginalité économique) à habiter sur une zone exposée aux aléas (Hewitt, 1983 ; Maltby, 1986 ; Kreimer et Munasinghe, 1991 ; Winchester, 1992 ; Wisner et Luce, 1993 ; Gaillard, 2008 ; Leone, 2008 ; Texier, 2009). Le niveau social demeure en effet plutôt très bas, avec des problèmes de forts taux de chômage

qui poussent la majorité des habitants à vivre d'activités informelles et précaires. Contrairement aux quartiers situés plus en retrait de la rivière, l'hygiène est problématique ; 68% des habitants se plaignent d'invasions d'animaux nuisibles, notamment les rats, compte tenu de déchets mal gérés (ce qui rappelle les observations faites par P. Texier sur les quartiers pauvres exposés aux inondations à Jakarta, Texier, 2007 et 2009). Enfin, 41% ne disposent pas d'installations sanitaires à domicile. Par ailleurs, 20% des habitants ne possède pas de titre de propriété en règle. Ils ont construit illégalement leur domicile sur des terrains théoriquement non constructibles, ce qui les place en situation critique en cas de lahar de grande amplitude qui détruirait leur maison. Ces personnes ne disposent, en effet, d'aucun autre bien ; cette dépendance les rend particulièrement vulnérables aux lahars, car ils ne semblent pas avoir les moyens d'habiter ailleurs, les quartiers centraux situés à proximité étant relativement chers compte tenu de leur proximité avec le *keraton*. Ils ne peuvent donc pas abandonner leur quartier, auquel certains semblent d'ailleurs attachés (57%, Horny, 2012), en dépit de ce que regrettait Surono (directeur du Centre de Volcanologie et de Mitigation des aléas géologiques de Bandung) : « je ne comprends pas pourquoi ces gens continuent d'habiter là, à côté de la Code. Je leur ai pourtant dit qu'il fallait quitter ces maisons situées en plein dans la zone inondable par les lahars » (*Jakarta Globe*, 30 novembre 2010). Ces premiers éléments sont appelés à être prolongés et détaillés dans des études ultérieures.

Ils montrent, en tout cas, que les populations du talus distal du Merapi, aussi bien en zone rurale qu'en milieu urbain, sont vulnérables. Le tissu social est dépendant de fortes contraintes économiques, sociales et spatiales qui sont source de vulnérabilité urbaine (Thouret et D'Ercole, 1996) et peuvent rendre dramatiques les destructions engendrées par les lahars.

2. Des riverains préparés aux lahars ?

Sur ces différents espaces, où la vulnérabilité est élevée compte tenu d'un niveau de vie parfois très dépendant d'un quotidien contraignant, le risque lié aux lahars eux-mêmes est-il bien perçu par les riverains des rivières du Merapi ? Afin de répondre à cette question, une enquête par questionnaire a été réalisée en décembre 2010. L'objectif est de fournir des données quantitatives sur la manière dont les habitants du Merapi perçoivent les lahars, au moment où les premiers événements commençaient à se dérouler. Ce questionnaire a valeur de diagnostic devant permettre de déterminer si les habitants du Merapi connaissent convenablement l'aléa lahar et ses impacts potentiels (identifiés ci-dessus et au chap. 3). En dépit de la méfiance de certains chercheurs concernant les enquêtes de connaissance de l'aléa et de perception du risque (Gaillard, 2008), le choix de cette méthode s'avérait nécessaire pour pouvoir comprendre la manière dont les personnes menacées comprennent l'aléa auquel elles sont exposées.

2.1 Résultats du questionnaire

Les questionnaires ont été adressés à 630 personnes âgées de 9 à 81 ans, 57% d'hommes et 43% de femmes, vivant dans 20 communes (*desa*) situées à proximité des rivières susceptibles d'être traversées par des lahars (voir chap. 2 ; détail en annexe D.1). À quelques exceptions près qui seront discutées plus bas, la majorité des personnes connaît correctement l'aléa lahar. 61% des répondants donnent la définition la plus correcte d'un lahar (question 4), tandis que 8,6% en proposent une définition incomplète (oubliant de citer le transport de blocs et de débris). Concernant les impacts des lahars (questions 7, 8, 9, 10), près de 75% des personnes sondées apportent de bonnes réponses ; le pourcentage de ceux qui ignorent la réponse demeure très bas (< 1%) sauf pour la question 8 (« les lahars peuvent-ils détruire les maisons ? ») où ce taux atteint 4,2%. Il existe une perception assez

mitigée du danger lié aux lahars (question 3). Un tiers des répondants déclare ne pas en avoir peur du tout (33,6 %), mais un autre tiers les redoute (35,7%), tandis que ceux qui les craignent beaucoup ne représentent que 8,2%. Dans l'ensemble, les lahars représentent un danger pour moins de la moitié de l'échantillon ; la perception demeure cependant très variable en fonction des sites d'enquête.

En revanche, l'une des questions à laquelle les réponses ont été particulièrement homogènes sur l'ensemble des communes investiguées est celle concernant la vitesse d'écoulement des lahars (question 5). La totalité des répondants s'est révélée incapable d'estimer justement un ordre de grandeur : 98,4% s'en éloignent même entièrement, et seuls 1,6% sont légèrement plus réalistes. En effet, la vitesse des lahars au Merapi est très rarement supérieure à 7 m/s (25 km/h), ce qui invalidait *de facto* les possibilités de réponse 2, 3 et 4. Cette exagération des vitesses est très certainement due au fait que les personnes, alors interrogées dans les centres d'évacuation, n'avaient pas pu encore voir des lahars autrement qu'à la télévision ou sur internet.

Dans l'ensemble, les résultats de ce questionnaire montrent que les connaissances fondamentales sur les lahars sont assez convenables malgré quelques idées reçues ; en revanche, la perception du danger, que ce soit en termes de peur inspirée par l'aléa, ou bien en termes de connaissance des dégâts possibles, demeure très variable selon les sites d'enquêtes (Figure 57).

2.2 Variabilité entre sites : une inégale perception du danger au Merapi

2.2.1 Les communes de l'ouest du volcan

Les réponses de chaque commune (*desa*) au questionnaire traduisent une distinction essentielle entre les versants ouest et sud. Les *desa* situés aux abords des rivières Senowo, Pabelan, Blongkeng et Putih ont tous montré une excellente maîtrise des impacts liés aux lahars, avec 100% de bonnes réponses systématiques aux questions 6 à 10 (Figure 57, détail annexe D.1). L'ensemble des répondants de ces *desa* est parfaitement averti des conséquences dangereuses des lahars : les personnes qui ont répondu à l'enquête savent que les lahars circulent dans le lit des rivières, mais aussi qu'ils peuvent déborder, et causer des dommages sur les maisons, les ponts et les routes. En revanche, les définitions données au terme lahar sont de qualité inégale, mis à part dans le *desa* Sumber, situé le long de la Senowo, où 100% des répondants ont été capables de donner la définition attendue. À Bringin, le long de la Blongkeng, les définitions ont été plus fautives puisque 50% omettent de mentionner la présence de blocs transportés par les flux, et personne ne cite la présence de débris organiques (végétaux notamment). Dans la Senowo et dans la Putih, qui ont subi des lahars jusqu'au début des années 2000, la totalité des répondants déclare avoir peur des lahars. On y sent la persistance d'une crainte qui semble avoir légèrement disparu le long de la Pabelan et de la Blongkeng, où les dernières occurrences de lahars datent d'il y a au moins 40 ans. Dans les communes situées le long de ces deux rivières, personne ne déclare « avoir très peur » des lahars, mais un grand nombre (> 70% dans la Pabelan) a tendance à sous-estimer le danger. C'est là également que les définitions de lahars ont été les moins convaincantes. Cependant, les répondants du versant occidental semblent globalement bien préparés aux lahars : les processus, les conséquences et la perception de l'aléa révèlent une certaine familiarité avec ce type de phénomène.

2.2.2 Les communes du sud du volcan

À l'inverse, les communes du sud du Merapi apparaissent beaucoup moins bien préparées aux lahars, notamment celles situées le long de la Bebeng (sud-ouest du volcan), de la Boyong et de la Kuning (sud du volcan). Dans ces trois cas de figure, les répondants se sont systématiquement trompés dans leur appréciation des impacts liés aux lahars (Figure 57). Contrairement aux sites de l'ouest, où les réponses étaient unilatéralement les bonnes pour la totalité des répondants, les communes du sud

montrent une connaissance moindre des caractéristiques des lahars, mis à part des taux maximaux de bonnes réponses à la question 6, suggérant que les habitants savent que les lahars circulent le long des cours d'eau. Ils sont ainsi jusqu'à 72% à penser que les lahars ne peuvent pas déborder (*desa* Kamongan, Bebeng – Figure 58B). Un grand nombre pense également que de tels écoulements ne peuvent pas détruire de maisons : 84% (Kamongan), 92% (Candibinangun et Donoharjo, Boyong), 62,5% (Hargobinangun, Kuning – Figure 57C). Plus étonnant est le nombre de personnes qui ne croient pas qu'un lahar puisse emporter un pont : 72% (Kamongan), 92% (Candibinangun et Donoharjo, Boyong), 62,5% (Hargobinangun, Kuning), traduisant une réelle méconnaissance de l'énergie déployée par un lahar (Figure 58D). La proximité de ces chiffres d'une question à l'autre montre qu'il existe bien un noyau dur d'une forte majorité de personnes qui se méprennent sur le problème des lahars. On observe d'ailleurs l'existence de pourcentages parfois assez élevés de personnes qui ne savent pas répondre, notamment dans le *desa* Purwobinangun (Boyong) : plus du tiers des répondants ignorent ainsi si les lahars peuvent ou non détruire des maisons et des routes. La proportion de personnes qui déclarent ne pas craindre les lahars est élevée (Figure 58A), comparativement au versant ouest du volcan où aucun répondant n'avait fait ce choix de réponse. Le nombre de personnes qui ne craignent pas les lahars est parfois même majoritaire : 60% à Kamongan (Bebeng), 69,2% à Purwobinangun (Boyong), 61,2% à Hargobinangun (Kuning). Enfin, une légère gradation du risque vers l'aval peut être repérée le long de la Boyong : les réponses sont particulièrement mauvaises à Candibinangun et Donoharjo, situées en aval de Purwobinangun, traduisant vraisemblablement un souvenir insuffisant des lahars dans les mentalités. A contrario, les meilleures réponses observées sur la Gendol ou sur la Woro (Figure 58), qui ont connu des lahars après l'éruption de 2006, montre que les riverains sont mieux au fait de l'aléa. Tout comme sur le versant ouest, ils affichent d'excellents taux de bonnes réponses aux questions 6 à 10, avec toutefois quelques erreurs signalées à Argomulyo, commune située en aval de Kepuharjo sur la Gendol (corroborant éventuellement l'idée d'une méconnaissance qui s'accroît vers l'aval le long de certaines vallées). Cependant, les taux de personnes qui déclarent ne pas avoir peur des lahars rejoint ceux déjà évalués sur le reste du versant sud, notamment dans la Woro (47,5% et même 100% à Bawukan).

La variabilité entre les sites d'enquête montre une inégale connaissance de l'aléa lahar autour du Merapi en décembre 2010, et une inégale préparation aux événements qui peuvent en découler. Sur le versant ouest, les populations rencontrées semblent plus familières de ce type d'aléa qu'au sud. Le long des rivières Bebeng, Boyong et Kuning, la méconnaissance de l'aléa induit une inadaptation de la perception du risque qui en découle. La Boyong a certes connu plusieurs lahars après l'éruption de 1994, jusqu'à la fin de la décennie 1990, mais ces derniers ont rarement dépassé le talus médial du volcan et n'ont pas causé de dommages (Lavigne, 1998 ; Lavigne et Thouret, 2002).

2.3 Des facteurs d'explication sociologiques, économiques ou démographiques ?

Outre une évidente logique spatiale, la connaissance de l'aléa et la perception du danger est-elle contrainte par des données sociologiques voire démographiques ? Des tests du khi² (χ^2) ont été réalisés à partir de tableaux de contingence sur l'ensemble des données, afin de déterminer quelles données pouvaient être liées. Les critères choisis sont les suivants : genre et âge des répondants, et habitude à travailler dans un milieu exposé aux lahars (carrières aménagées dans les dépôts), par rapport aux questions portant sur : (1) le sentiment de crainte qu'inspirent les lahars ; (2) la capacité à apporter une définition complète du terme lahar ; (3) les impacts des lahars sur le bâti. Celles-ci ont été choisies pour leur significativité en terme de perception et connaissance du danger et de l'aléa, mais aussi parce qu'elles comportaient des réponses suffisamment variées pour éviter de produire des tableaux de contingence aux effectifs théoriques < 5 (sur lesquels l'analyse bivariée du khi² n'est pas valable).

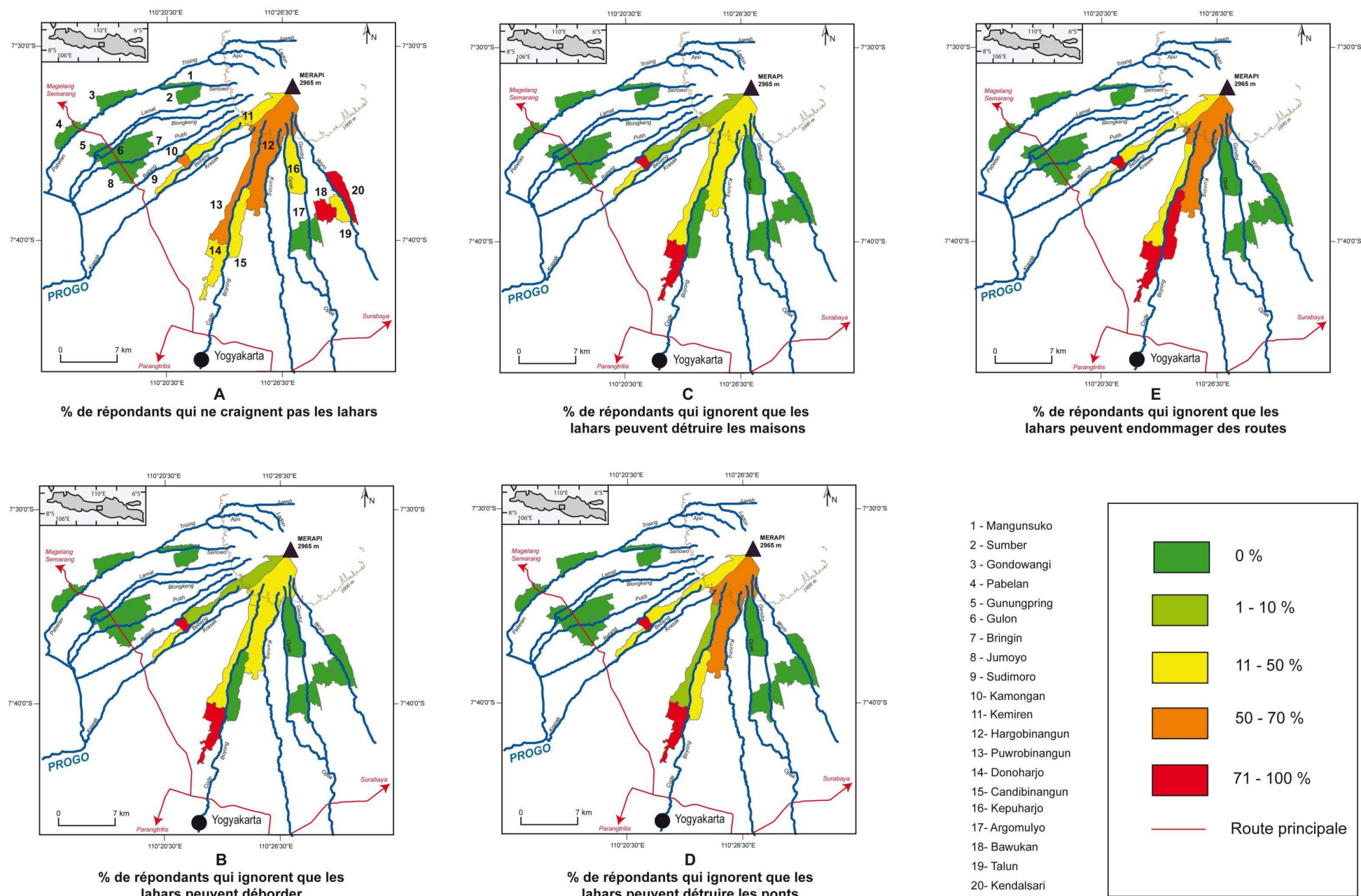


Figure 57 - Connaissance et perception des lahars autour du Merapi

Tableau 20 – Relation entre identité des répondants et perception du dangerLa relation est acceptable lorsque $p\text{-value} < \alpha$ avec $\alpha = 0,05$ (seuil de signification du χ^2)

Questions	Répondants	Genre	Âge	Travaillent dans les carrières
Perception du danger		$p\text{-value} < 0,0001$	$p\text{-value} = 0,675$	$p\text{-value} = 0,204$
Capacité à donner une définition exacte		$p\text{-value} = 0,005$	$p\text{-value} = 0,637$	$p\text{-value} < 0,0001$
Connaissance des impacts sur le bâti		$p\text{-value} < 0,0001$	$p\text{-value} = 0,767$	$p\text{-value} < 0,0001$

Le Tableau 20 montre que la perception et les connaissances générales concernant l'aléa lahar n'apparaissent pas du tout liées à l'âge des répondants. En revanche, le genre peut être un meilleur facteur d'explication de l'ensemble des questions testées. Il semblerait que les femmes perçoivent mieux le danger lié aux lahars, elles sont plus nombreuses que les hommes à déclarer « en avoir peur » ; en revanche, elles donnent moins souvent des définitions exactes que les hommes, et ont tendance notamment à ignorer les impacts destructeurs des lahars. Il existe ainsi un réel problème de perception et de connaissance lié au genre, dont l'origine n'est pas évidente à déterminer. Les éventuelles opérations de réduction des risques et de bilans de vulnérabilité devront veiller à investiguer cette différenciation liée au genre.

Dans le cas des carrières aménagées dans les dépôts de lahars, l'exposition des travailleurs aux aléas en favorise une meilleure connaissance, mais n'est pas corrélée à la perception du danger. Les personnes qui travaillent dans les carrières sont capables de mieux définir les aléas, et en connaissent mieux également les impacts, sur les maisons notamment.

Il existe donc des facteurs d'explication sociaux et économiques à la perception et à la connaissance de l'aléa lahar autour du Merapi. Si l'âge n'est pas une variable permettant de les expliquer, le genre est bien corrélé à la perception du danger, de même que l'expérience de travail dans un milieu très exposé aux lahars. Ce dernier point, compte tenu de son ampleur au Merapi, sera plus longuement présenté, analysé et discuté dans la troisième partie de cette thèse.

Les espaces menacés et les plus riches d'enjeux sont situés sur le talus distal de l'édifice volcanique du Merapi, et concernent aussi bien la zone urbaine de Yogyakarta que des zones rurales. Dans les deux cas, les populations apparaissent vulnérables, ainsi que l'ont déjà montré plusieurs auteurs. Pour préciser ces résultats, un questionnaire a été réalisé auprès d'un échantillon de 630 personnes sur les flancs du volcan afin d'évaluer leur perception et leur connaissance des lahars en tant qu'aléas. Les résultats du questionnaire mettent en évidence des perceptions du danger faibles dans les communes traversées par la Bebeng, la Boyong et la Kuning, plus particulièrement dans leur partie aval. Ajouté à la forte probabilité de débordements sur le talus distal du volcan, cette inadéquation entre la réalité du phénomène et sa perception montre une mauvaise préparation de certains habitants aux dangers qui les menacent. À cette variabilité spatiale de la perception s'ajoutent des facteurs d'explication socioéconomiques, liés essentiellement au genre et à l'activité professionnelle des répondants. La conséquence de cette connaissance parfois insuffisante de l'aléa, surtout dans la partie distale du volcan, s'est traduite par la construction de maisons le long de rivières en apparence de petites dimensions, mais qui ont pourtant été traversées par les lahars. Ainsi, le risque est bien réel, principalement sur le talus distal du volcan : l'aléa menace des populations vulnérables, parfois mal préparées, vivant sur des espaces riches d'enjeux.

II. LES IMPACTS

Les principaux impacts des lahars ont concerné les habitations, les infrastructures et les surfaces agricoles. En dépit de la fréquence d'occurrence répétée des lahars dans certaines rivières et de l'intensité de certains événements (cf. chap. 3), le nombre de victimes était peu élevé en 2010-2011. Trois personnes ont été tuées par un lahar, une dame âgée dans la Putih le 9 janvier 2011 à Sirahan (lahar à débit de pointe $Q_p = 1300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en amont de cette commune, voir chap. 3), et deux personnes dans la Krasak à Pondokrejo en février 2011 alors qu'elles récupéraient du sable dans les dépôts volcanoclastiques. On dénombre aussi une quinzaine de blessés, essentiellement des personnes brûlées par la température élevée des lahars de la Gendol (essentiellement à Sindumartani le 19 mars). Une personne a survécu après avoir été emportée dans la Opak à la fin de l'année 2010, malgré de très sérieuses blessures.

Le bilan humain est ainsi peu élevé, et montre que les populations ont été capables de se protéger efficacement contre les lahars. Toutefois, cet aspect relativement rassurant ne doit pas occulter l'impact majeur des lahars, qui ne concerne pas forcément la vie humaine, mais plutôt les moyens d'existence et de subsistance : maisons, infrastructures, ressources agricoles ont été, principalement dans 7 communes, particulièrement touchées.

1. Les habitations endommagées sur le talus distal

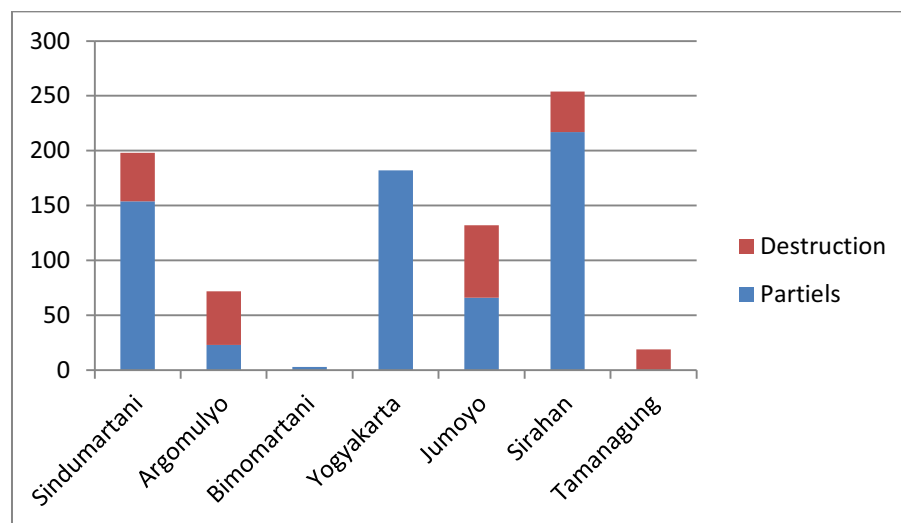


Figure 58 - Maisons partiellement endommagées et maisons détruites par les lahars (valeurs par communes, pendant la saison des pluies 2010-2011)

Les dégâts ont été recensés pour l'ensemble des lahars survenus pendant la saison humide 2010-2011. Au total, 860 maisons⁵ ont été touchées, 215 entièrement détruites et/ou ensevelies, 645 endommagées, les habitants pouvant continuer à y vivre après quelques réparations (Figure 58; Figure 59). Les communes (*desa*) Sindumartani (aval de la Gendol), Jumoyo et Sirahan (aval de la Putih)

⁵ Les maisons javanaises sont généralement bâties en maçonnerie, en bois et/ou en bambou tressé. Le recensement mené par E. Mei et A. Picquout pour leurs doctorats respectifs (en préparation) dans le cadre du programme MIA-VITA montre que 85% des maisons des villages du Merapi sont bâties *en dur* (maçonnerie, béton, poutres de bois massif), contre 2% en bois seulement, 9% en bois et bambou tressé, 2% en bambou tressé uniquement. Les dégâts présentés ici concernent donc essentiellement, si ce n'est uniquement, des habitations bâties « en dur ».

totalisent 90% des dégâts sur les habitations (587 maisons détruites ou endommagées). Compte tenu du nombre d'habitations détruites et abandonnées, et celles sévèrement endommagées qui ne peuvent plus abriter leurs propriétaires, on estime l'effectif total des personnes affectées par les lahars à plus de 3000 personnes dont des centaines de sans-abris. Pour ces derniers, certains centres d'accueils aménagés pendant la phase éruptive du Merapi ont été rouverts au début de l'année 2011, en même temps que les dégâts devenaient dramatiques notamment dans la Putih où certains villages ont été quasiment entièrement rayés de la carte (exemple de Sirahan).

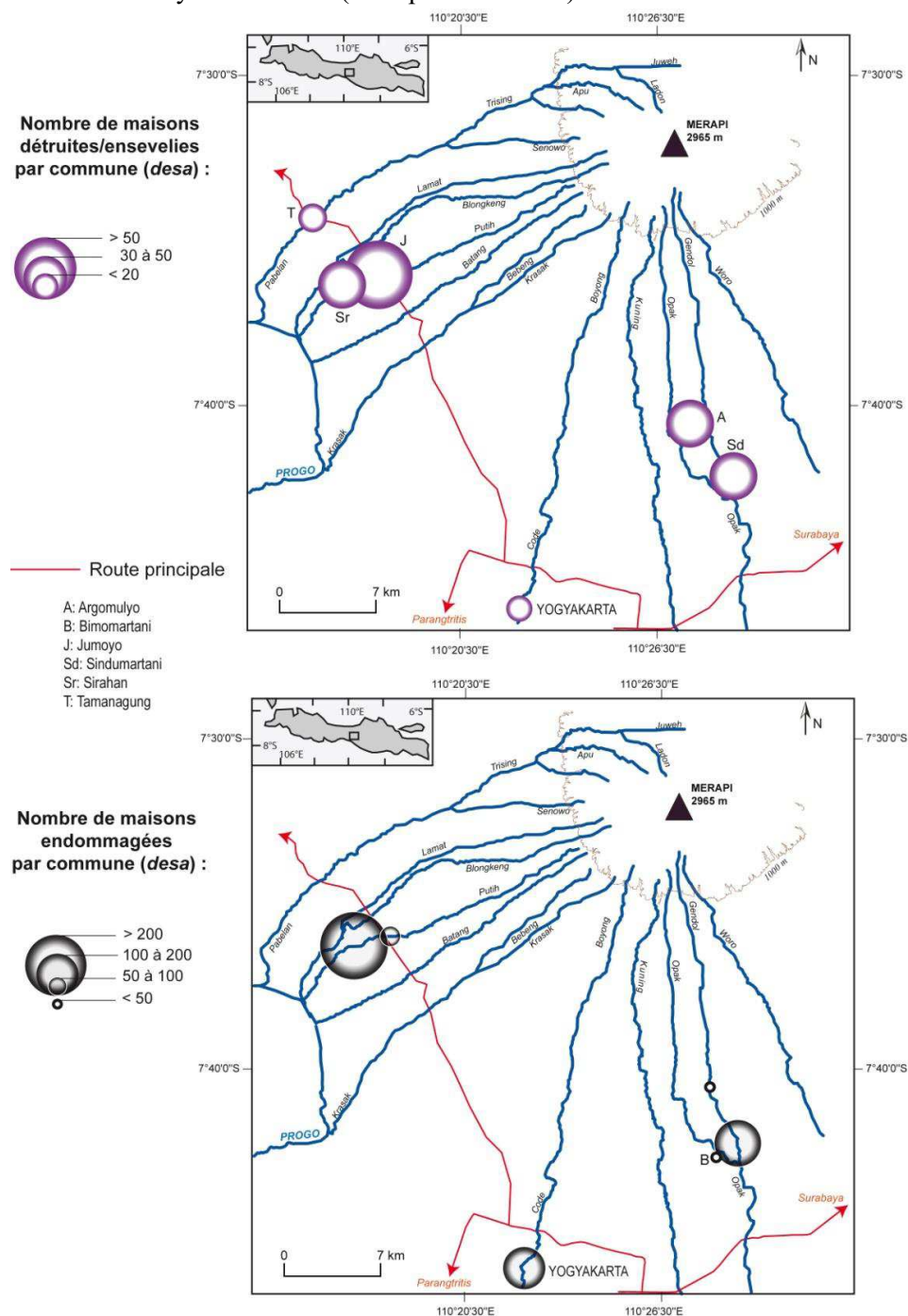


Figure 59 - Nombre de maisons détruites et endommagées par les lahars
Relevé dans chaque commune (desa) qui a subi des dégâts pendant la saison des pluies 2010-2011

Ce paragraphe présente une typologie des dégâts dans les villages établies selon deux critères : (1) le caractère réversible ou irréversible des dégâts ; (2) l'aspect des dommages, en lien avec les dynamiques morphogènes des lahars mises en évidence au chapitre 3. Il s'appuie principalement sur des relevés de terrain et les rapports fournis par les administrations des communes, dont l'exhaustivité et la qualité demeure variable (cf. chap. 2).

1.1 Les dégâts partiels

Les dommages partiels représentent 68% des dégâts dans les communes du Merapi qui ont été frappées par la formation des corridors de lahars (dynamiques d'élargissements de chenaux, de défluviations, de débordements). Celles-ci sont toutes situées sur le talus distal du volcan, et sont essentiellement localisées le long des rivières Gendol, Opak, Code, et Putih (Figure 60). Le degré d'endommagement est établi selon une échelle progressive de dégâts allant de l'absence de dommage à la destruction de la quasi-totalité de l'édifice (Figure 60). Quatre niveaux d'impacts ont été établis d'après les observations de terrain :

- A. « faiblement endommagé » pour les maisons qui ont encore leur toit et les murs, mais sont remplies par des dépôts de lahar ayant endommagé le mobilier ;
- B. « modérément endommagée » pour les maisons dont la maçonnerie est intacte, mais dont les dépôts intérieurs excèdent 1 m d'épaisseur ;
- C. « fortement endommagés » pour les maisons qui ont perdu 1 mur et dont la toiture est abîmée ;
- D. « très fortement endommagé » pour les maisons dont 2 murs principaux et la quasi-totalité de la toiture ont été détruits par les lahars.



A



B

- A : Exemple de maison faiblement endommagée. Le front d'un lahar de la Opak a provoqué un débordement dans le village de Panggung le 22 mars 2011. Quelques minutes plus tard, un écoulement boueux moins concentré incise les dépôts laissés par le débordement. Repérer en pointillés la *mudline* sur la maison, témoignant d'une profondeur de 1,1 m. L'énergie du débordement a été insuffisante pour abîmer la maison. Toutefois, la pénétration de l'eau boueuse par les interstices de l'édifice endommage le mobilier et l'électricité. Cliché E. de Bélizal (mars 2011).
- B : exemple de maison légèrement endommagée. Structure toujours présente (murs, toiture), mais présence de dépôts de lahars (1,4 m) qui ont dévasté le mobilier. Cette habitation auparavant entourée de jardins, à 4 m de la rivière Opak dans le village Teplok, s'est retrouvée menacée par l'élargissement du chenal (cf. chap. 3) dès janvier 2011. Cette exposition aux lahars a amené les habitants à abandonner leur maison, condamnée à brève échéance. Cliché E. de Bélizal (février 2011).



C



D

C : exemple de maison fortement endommagée. Même maison que l'exemple B, un mois plus tard, après le lahar du 22 mars 2011 dans la Opak. La partie arrière de la maison a été crevée par les lahars, et la toiture endommagée. Les dépôts sont également plus massifs à l'entrée. Remarquer que le lit mineur de la rivière passe désormais juste aux pieds de l'édifice. Cliché E. de Bélizal (mars 2011).

D : exemple de maison très fortement endommagée. Une partie des murs a été emportée avec la toiture. Les dégâts ont été provoqués par la défluviation de la rivière Gendol dans le village Ngerdi le 1^{er} mai 2011. Le chenal secondaire de la Gendol ainsi créé au milieu du village par le lahar coule au premier plan de la photographie. En pointillé la *mudline* qui indique la profondeur du flux lorsqu'il a frappé l'habitation (2,1 m). Cliché E. de Bélizal (mai 2011).

Figure 60 - Exemple des dégâts partiels des lahars sur l'habitat

En fonction de l'intensité des dommages, la rénovation est plus ou moins rapide, d'autant que l'entraide entre membres d'un même village (*dusun*) est monnaie courante (cf. *infra*, III. 1.3). À l'exception de Sirahan (cf. *infra* 1.3), il n'est pas possible de reconstituer a posteriori la qualité précise des impacts sur le bâti tant les réparations se font rapidement, notamment pour les dégâts mineurs (type A voire B). En l'absence de statistiques normalisées, une cartographie précise des impacts n'est pas envisageable. En revanche, l'analyse des images satellites GeoEye permet de dresser une première spatialisation des dommages pour les communes impactées de la Putih. On remarque que les dégâts sont surtout situés au niveau des sinuosités du chenal (Sirahan, Figure 61), et de la division de la rivière en deux lits distincts au niveau de la route Yogyakarta-Semarang (Jumoyo Figure 62). Dans les deux cas, on remarque que les dommages sont particulièrement intenses sur une zone de 100 m de part et d'autre du chenal de la rivière. À Jumoyo, toutes les maisons situées près de la route Semarang-Yogyakarta ont été touchées par les lahars, et 80% d'entre elles ont été sévèrement impactées (sans que l'on puisse en reconstituer le détail après quelques semaines de réparations et sans archives disponibles). L'étendue des dépôts montre en outre que les lahars peuvent s'étendre jusqu'à 300 m hors du lit mineur. Il existe donc une exposition maximale à moins de 100 m de la rivière, avec des dégâts particulièrement nombreux, puis une zone d'extension probable des lahars jusqu'à 300 m. En théorie, la reconstruction des villages impactés devrait prendre en considération cette zonation du danger ; en pratique, la pression démographique risque fort de l'en empêcher.

Le *desa* Sindumartani (Gendol) a été également touché par ces endommagements partiels avec 154 maisons endommagées pendant la saison des pluies 2010-2011 (Figure 58). Ces dégâts peuvent grever pendant plusieurs jours la vie économique du village, alors entièrement occupé à déblayer les dépôts et réparer les maisons qui peuvent l'être.

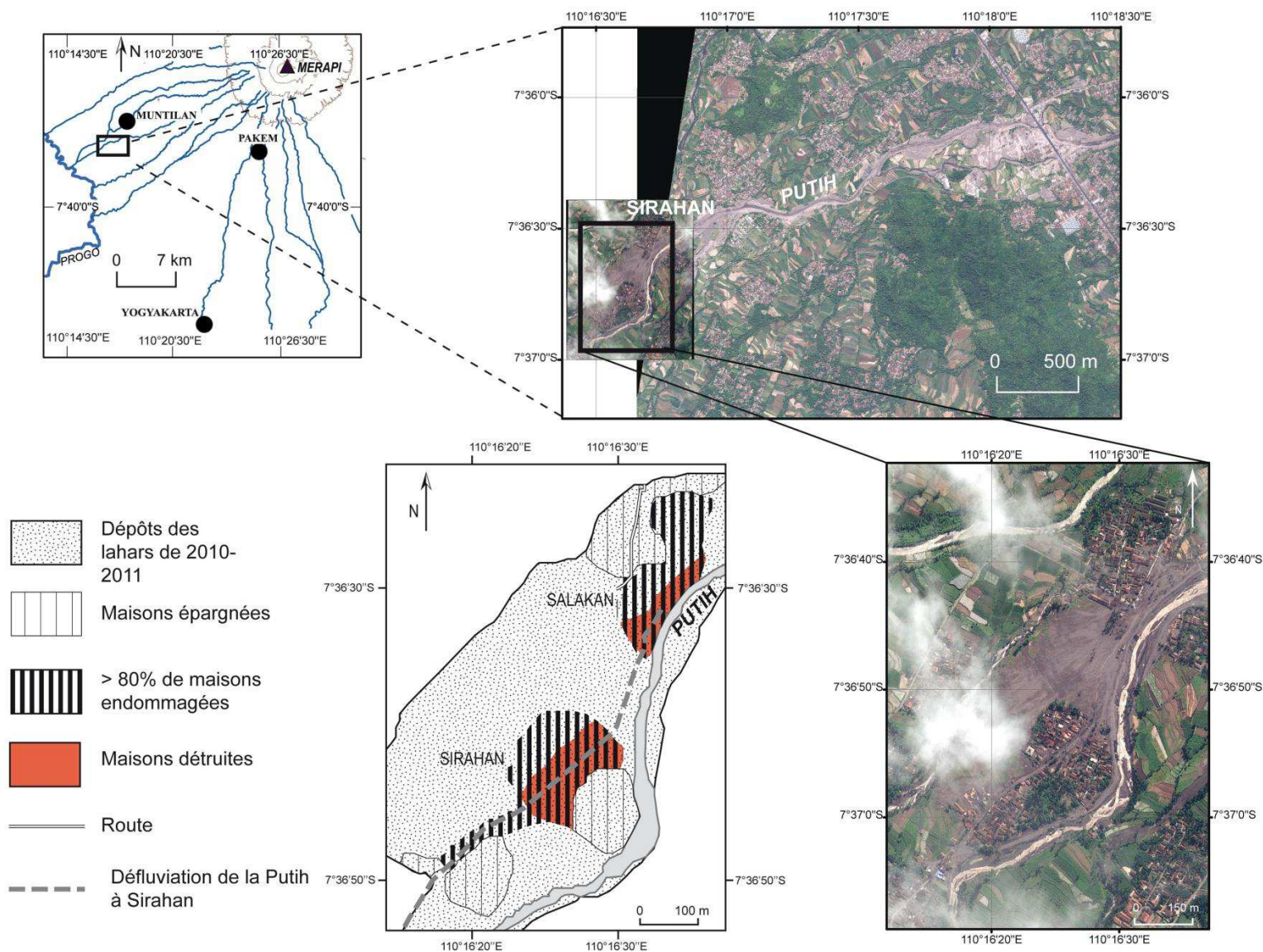
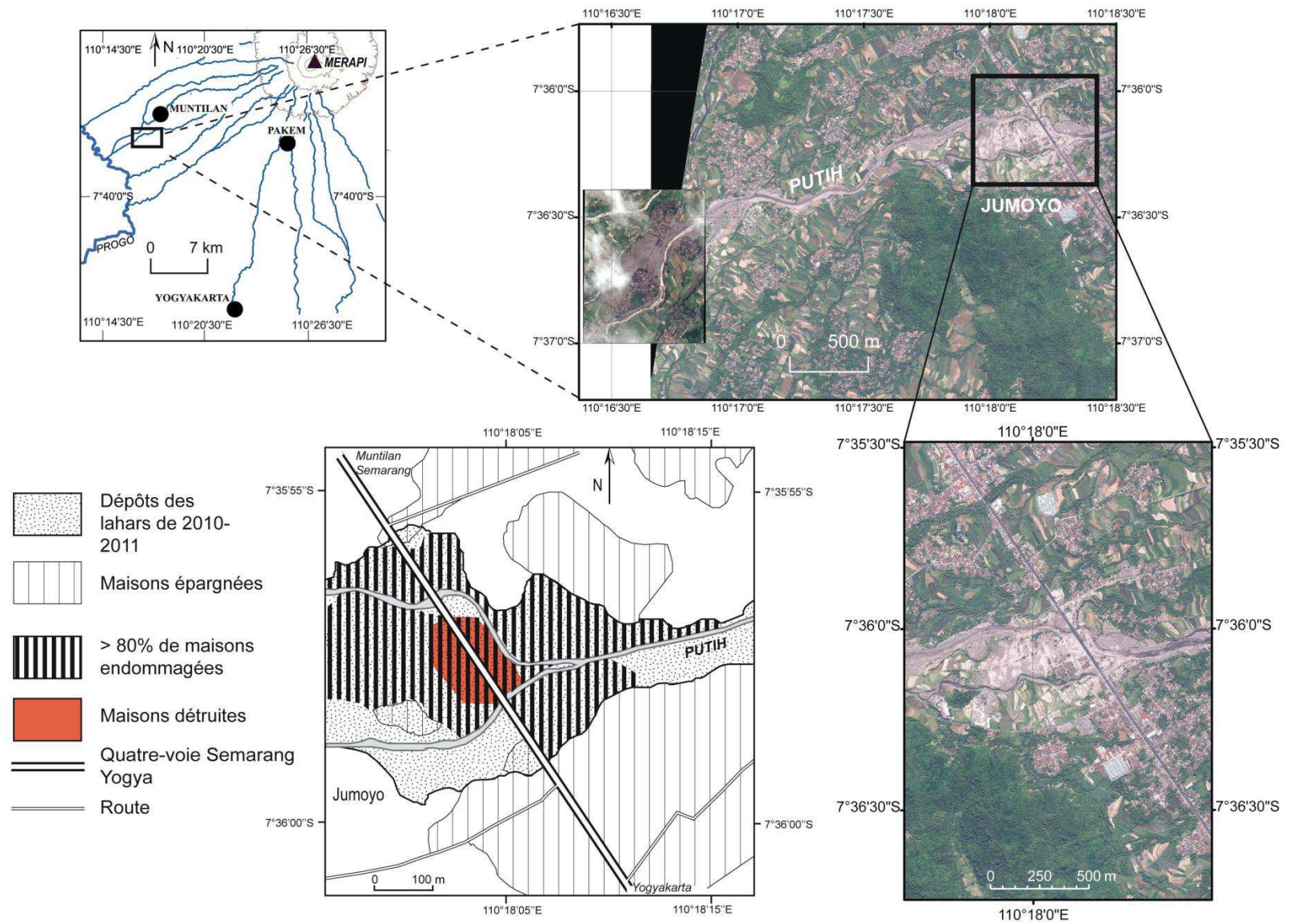


Figure 61 - Les dégâts à Sirahan (images GeoEye, juin 2011)



1.2 Les dégâts irréversibles

On appelle « dégâts irréversibles » les dommages qui ne peuvent être amendés par aucune réparation, mais qui exigent une reconstruction entière de l'infrastructure impactée. Cette distinction est essentielle à faire dans le cas d'un espace comme celui du Merapi, puisqu'elle permet de distinguer les foyers qui devront être relogés, et ceux qui pourront rester chez eux moyennant quelques travaux – à condition bien sûr que les chenaux soient endigués pour éviter de nouveaux endommagements. Ce premier critère d'évaluation des dommages est affiné par un second critère, concernant le mode de destruction. Dans le cas des lahars, les dégâts irréversibles sont provoqués par deux phénomènes : la destruction et l'ensevelissement progressif.



DESTRUCTION

Habitations et magasins entièrement dévastés par le lahar du 9 janvier 2011 à Jumoyo. Le lahar a percuté puis enfoncé l'arrière du bâtiment qui a été broyé et emporté. Seules subsistent les façades. Noter la présence de blocs de taille métrique bloqués parmi les piliers des façades. Ces dépôts traduisent la compétence du lahar, suffisamment puissant pour transporter ces blocs, qui ont joué un rôle majeur dans l'intensité des dégâts survenus à Jumoyo. Cliché F. Lavigne (janvier 2011).



ENSEVELISSEMENT

Juste en aval de Jumoyo, à Sirahan, les lahars qui se sont succédé ont moins détruit qu'ils n'ont enseveli les habitations. Les blocs transportés par les écoulements de grande intensité (9 janvier, 5 février, 19 mars 2011) étaient généralement bloqués à Jumoyo. En revanche, la concentration en matériel plus fin a conduit à une rapide sédimentation à Sirahan. En témoignent ces habitations du village (*dusun*) Salakan, recouvertes par 3,5 m de dépôts. Le premier étage de la maison du fond est d'ailleurs devenu le nouveau niveau de base de l'habitation (qui n'était plus occupée). Cliché E. de Bélizal (mars 2011).

Figure 63 - Les deux catégories de dommages irréversibles

1.2.1 La destruction

La destruction (ou démolition) d'un édifice par un lahar peut-être totale lorsque le flux est riche en blocs (> 20 cm) capables d'emporter les murs (Figure 63). Cela se produit ainsi essentiellement dans le cas de lahars énergiques, capables de transporter des matériaux de grande taille, et de déborder sur les interfluvies. Ce type d'événement est bien représenté sur la Opak (desa Argomulyo, Figure 59), dont la forme du chenal n'a cessé de s'élargir. À Panggung, cette dynamique d'élargissement a entamé les jardins et maisons des riverains depuis janvier 2011 (chap. 3). Au fur et à mesure du rapide réajustement de la forme du chenal, 3 maisons se trouvèrent directement situées à l'intérieur du corridor emprunté par les lahars, et frappées directement par les écoulements qui eurent tôt fait de les raser entièrement. Ce phénomène se retrouve également dans le cas de débordements capables de faire sortir le lahar du chenal. Dans le cas de Tamanagung (Pabelan), les 19 maisons du

village (*dusun*) Sidoharjo ont été balayées en une seule fois par le puissant lahar du 30 mars 2011 (chap. 3). De même, les lahars du 19 mars, du 22 mars et du 1^{er} mai 2011 ont détruit 69 maisons le long de la Gendol, principalement dans les villages Jaranan (*desa* Argomulyo) puis à Kayen plus en aval (*desa* Sindumartani). Le même exemple se retrouve dans la commune (*desa*) de Jumoyo, dont plusieurs *dusun* ont été quasiment annihilés, par les lahars survenus depuis le 9 janvier 2011. Les deux villages les plus touchés se trouvent de part et d'autre de la quatre-voie : il s'agit du *dusun* Gempol qui a notamment été détruit à 90% avec 49 maisons démolies et 52 endommagées, et du *dusun* Seloiring avec 9 maisons démolies. Ce sont ainsi 230 personnes qui ont perdu définitivement leur maison entre le 9 janvier et le 1^{er} mai 2011 dans le seul *desa* Jumoyo (Figure 62 et Figure 63).

1.2.2 L'ensevelissement progressif

L'autre catégorie des dégâts irréversibles est provoquée par l'ensevelissement progressif des habitations, peu à peu enterrées par les dépôts de lahars, sans pour autant avoir été auparavant détruites par les blocs (Figure 63). Elles ont ainsi conservé leurs murs et leur toit, mais disparaissent peu à peu sous la boue des dépôts. Le seul exemple visible est celui de Sirahan où une épaisseur moyenne de 3 m de sables a été mesurée, attestant de la fréquence des écoulements hyperconcentrés faiblement chargés en débris de grande dimension. On dénombre 20 maisons enterrées sous 1 à 3 m de dépôts de lahars (mai 2011), abandonnées par leurs propriétaires à partir de janvier 2011. La situation de Sirahan est en effet propice à une dynamique de sédimentation naturelle (talus distal du volcan), où la faible valeur de la pente favorise le ralentissement du flux et sa tendance à l'étalement. Seule la partie centrale des *dusun* Salakan et Sirahan a été détruite compte tenu de la dynamique de défluviation (cf. chap. 3). L'ensevelissement représente une part infime et spatialement très restreinte des dégâts irréversibles, et est le résultat non pas de l'impact destructeur d'un seul événement intense, mais de l'action accumulée de plusieurs lahars (25 entre le 9 janvier et le 1^{er} mai 2011) *a priori* d'énergie relativement faible, transportant peu de blocs.

Dans certains cas, la destruction irréversible de la maison peut s'accompagner de son ensevelissement dans les semaines qui suivent l'événement (Figure 64). À Tamanagung, une partie des maisons et des ateliers de sculpture détruits par la première pulsation du lahar ont été ensuite recouvertes sur 50 cm par une pulsation suivante de plus faible énergie, le 30 mars 2011 (chap. 5). À Panggung, les maisons désormais situées dans le corridor des lahars de la Opak disparaissent peu à peu sous les dépôts après avoir été détruites par les lahars de janvier 2011. Différentes dans leur temporalité, dans leur fréquence et dans leurs caractéristiques, les catégories de dégâts irréversibles ne sont ainsi pas forcément indépendantes. Une succession temporelle peut être observée entre une phase de destruction suivie d'une phase d'ensevelissement dans des contextes où la sédimentation est élevée. Par ailleurs, une succession spatiale peut également être esquissée, notamment dans le cas de la Putih : si les *dusun* de Jumoyo ont été détruits par les lahars, les *dusun* de Sirahan ont été plutôt ensevelis (mis à part le long du nouveau chenal formé par la défluviation).



Figure 64 - Ensevelissement progressif des habitations auparavant endommagées du *dusun* Glagah (commune de Sirahan) situées dans le corridor de lahar de la Putih, formé depuis le 9 janvier 2011.
Cliché E. de Bélizal, mars 2011.

1.3 Un exemple : Sirahan, la commune la plus touchée par les lahars

Il demeure assez difficile d'obtenir *a posteriori* des données précises et quantifiées sur les dommages liés aux lahars. D'abord parce que les réparations peuvent se faire rapidement, et donc fausser l'analyse sur le terrain. Ensuite parce que chaque commune (*desa*) fonctionne de manière autonome et n'est pas obligée de respecter une norme de déclaration officielle des dommages. Parmi l'ensemble des sept communes impactées, seuls les fonctionnaires de Sirahan ont rédigé un rapport complet sur l'ampleur des dégâts, distinguant précisément le nombre de maisons endommagées par *dusun* (village) doublée d'une appréciation qualitative des dommages. Le document distingue des dégâts « légers », « modérés », « forts » (que l'on peut rapprocher des catégories B, C et D identifiées ci-dessus) et enfin la destruction totale de l'édifice. Les autres communes n'avaient pas réalisé de documents aussi précis, la plupart se bornant simplement à recenser les maisons endommagées et les maisons intégralement détruites, sans entrer dans le détail. Grâce à ce document, une traduction statistique et spatiale des dommages à Sirahan a pu être réalisée au moins pour cette commune.

L'inventaire officiel fourni par la commune (Tableau 21) fait état de 33,1% de maisons légèrement endommagées, 20,5% de maisons modérément endommagées et 31,9% de maisons fortement endommagées. Le taux de dommages partiels de certains *dusun* est particulièrement élevé. Les dégâts ont été causés par les 25 lahars survenus dans la Putih après le 9 janvier 2011, mais trois événements majeurs semblent avoir causé le plus de dommages : le lahar du 23 janvier (14 maisons affectées), celui du 5 février (10 maisons) et celui du 19 mars 2011 (70 maisons). Au total, le quart des habitations du village a été frappé par les lahars (24,4%). Au total, certains *dusun* sont détruits à plus de 70% (Salakan, Glagah), témoignant de dommages particulièrement nombreux, accumulés tout au long de la saison des pluies 2010-2011. La plupart du temps, les dommages sont « légers » (Figure 65). Les destructions totales ne sont visibles qu'à proximité du corridor de lahar (Figure 65), dans les *dusun* situés à moins de 100 m de la rivière Putih et de la défluviation créée par les lahars. La rive gauche n'a pratiquement pas été touchée par les lahars.

Tableau 21 – Détails des dommages pour chaque village impacté de la commune Sirahan (d'après les relevés statistiques officiels de la commune)

<i>Dusun affecté par les lahars</i>	Nombre de maisons par <i>dusun</i>	Degré d'endommagement				Destruction	Taux de dommages			
		« Léger » (type A)	« Modéré » (type B)	« Fort » (types C et D)	Total de maisons endommagées		Nombre de maisons affectées	Taux de dommages partiels (%)	Taux de destruction (%)	Taux d'endommagement total (%)
Gemampang	89	13	7	4	24	1	25	27,0	1,1	28,1
Sirahan	86	11	0	30	41	11	52	47,7	12,8	60,5
Glagah	49	6	16	13	35	9	44	71,4	18,4	89,8
Jetis	73	0	21	15	36	4	40	49,3	5,5	54,8
Salakan	96	40	3	14	57	11	68	59,4	11,5	70,8
Candi	46	8	4	5	17	1	18	37,0	2,2	39,1
Purwosari	49	1	0	0	1	0	1	2,0	0,0	2,0
Gebayan	118	1	0	0	1	0	1	0,8	0,0	0,8
Trayem	100	4	1	0	5	0	5	5,0	0,0	5,0
TOTAL	706	84	52	81	217	37	254			

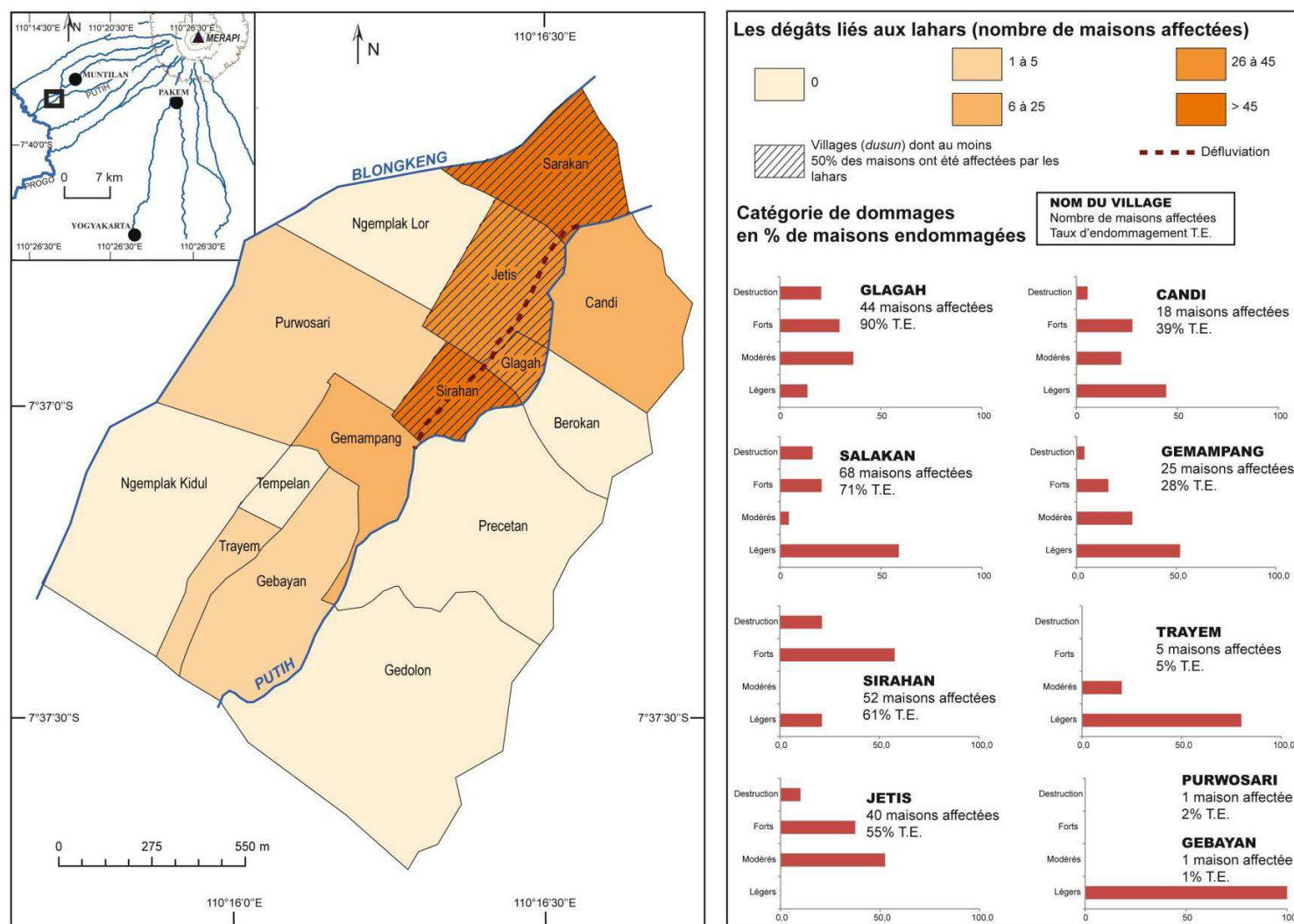


Figure 65 - Les dégâts par village (*dusun*) de la commune de Sirahan. Carte établie d'après des relevés statistiques dressés par la commune.
Rappel des équivalences entre la typologie des dommages de Sirahan et celle adoptée dans la thèse : *Légers* = type A ; *Modéré* = type B ; *Fort* = types C et D. Les limites des dusun ont été digitalisés d'après un entretien avec la mairie de la commune (*desa*).

1.4 Bilan

Le Tableau 22 montre que le nombre de personnes impactées par un lahar atteint 3007 personnes en juin 2011. À la même période, les sans-abris (maisons entièrement démolies) représentaient au moins 724 personnes en quête de logement, lequel demeurerait encore inégal et peu effectif. Sirahan est la commune qui a été la plus sévèrement touchée par les lahars ; avec Jumoyo, ces deux communes de l'aval de la Putih totalisent plus de la moitié des dommages provoqués par les lahars. Les centres d'évacuation qui avaient été aménagés pendant l'éruption ont ainsi été rouverts en janvier 2011 pour accueillir les personnes affectées par les lahars. Toutefois, les sinistrés n'ont pas été les seuls à se rendre vers les centres d'évacuation. Dans certains cas, des chefs de famille résidant près des corridors de lahars ont envoyé leur famille dans les centres d'évacuation proches en cas de pluie ou lorsqu'un lahar était annoncé. Ces flux momentanés, qui se faisaient généralement pour une nuit, ont concerné au total plus de 2000 personnes à Sirahan (Tableau 23; Figure 66). Il s'agit visiblement d'un effet d'entraînement, puisqu'ont suivi le mouvement d'évacuation des personnes provenant de villages (*dusun*) peu exposés aux lahars : 135 personnes proviennent en effet de Ngemplak Lor et Ngemplak Kidul, situés à plus de 500 m du corridor de lahars (Figure 65). La majorité des évacués (69%) provient cependant des *dusun* riverains de la Putih. On notera que ces flux ne sont pas systématiques : le tableau représente le total sur l'ensemble de la saison des pluies 2010-2011. D'après les fonctionnaires de Sirahan, l'essentiel de ces mouvements ont eu lieu de janvier jusqu'en mars 2011. La plupart des personnes n'évacuaient qu'une ou deux fois, puis ne prenaient plus ensuite la peine de faire le trajet jusqu'aux centres d'évacuation. L'organisation est compliquée, il faut se déplacer souvent en moto avec de lourds bagages, puis revenir le lendemain suffisamment tôt pour que les enfants ne ratent pas l'école.

Ces informations sur les flux depuis vers les villages jusqu'aux centres d'évacuation n'a pas pu être obtenue ailleurs, parce que les autres communes n'avaient pas toutes pris la peine de récolter les données. Les centres eux-mêmes ne tiennent pas forcément d'archives mises à jour. D'ailleurs, il n'existe pas de règle : comme le montrent le Tableau 23 et la Figure 66, les habitants d'un même village évacuent indifféremment vers l'un ou l'autre centre. D'après la presse, ce sont près de 3450 personnes dans le district de Magelang qui se rendraient momentanément dans les centres d'évacuation lorsque des lahars se produisent.

Tableau 22 - Le lourd bilan social des lahars après la saison des pluies 2010-2011 (d'après les données statistiques récupérées dans les administrations des *desa*. Pour Yogyakarta : Sri Hadmoko et al., 2012).

**population de la ville hors agglomération **situés à moins de 100 m de la rivière Code*

Commune	Nombre d'habitants	Nombre de foyers	Foyers touchés par les lahars	Nombre de personnes directement affectées	Nombre de maisons détruites	Nombre de sans-abris
Sindumartani	7849	2265	198	693	44	154
Argomulyo	6305	1949	62	200	49	158
Bimomartani	7264	2065	3	11	0	0
Jumoyo	?	?	132	463	66	230
Sirahan	3476	1041	254	851	37	123
Tamanagung	?	?	19	59	19	59
Yogyakarta	388 088*	3125**	182	730	0	0
TOTAL				3007		724

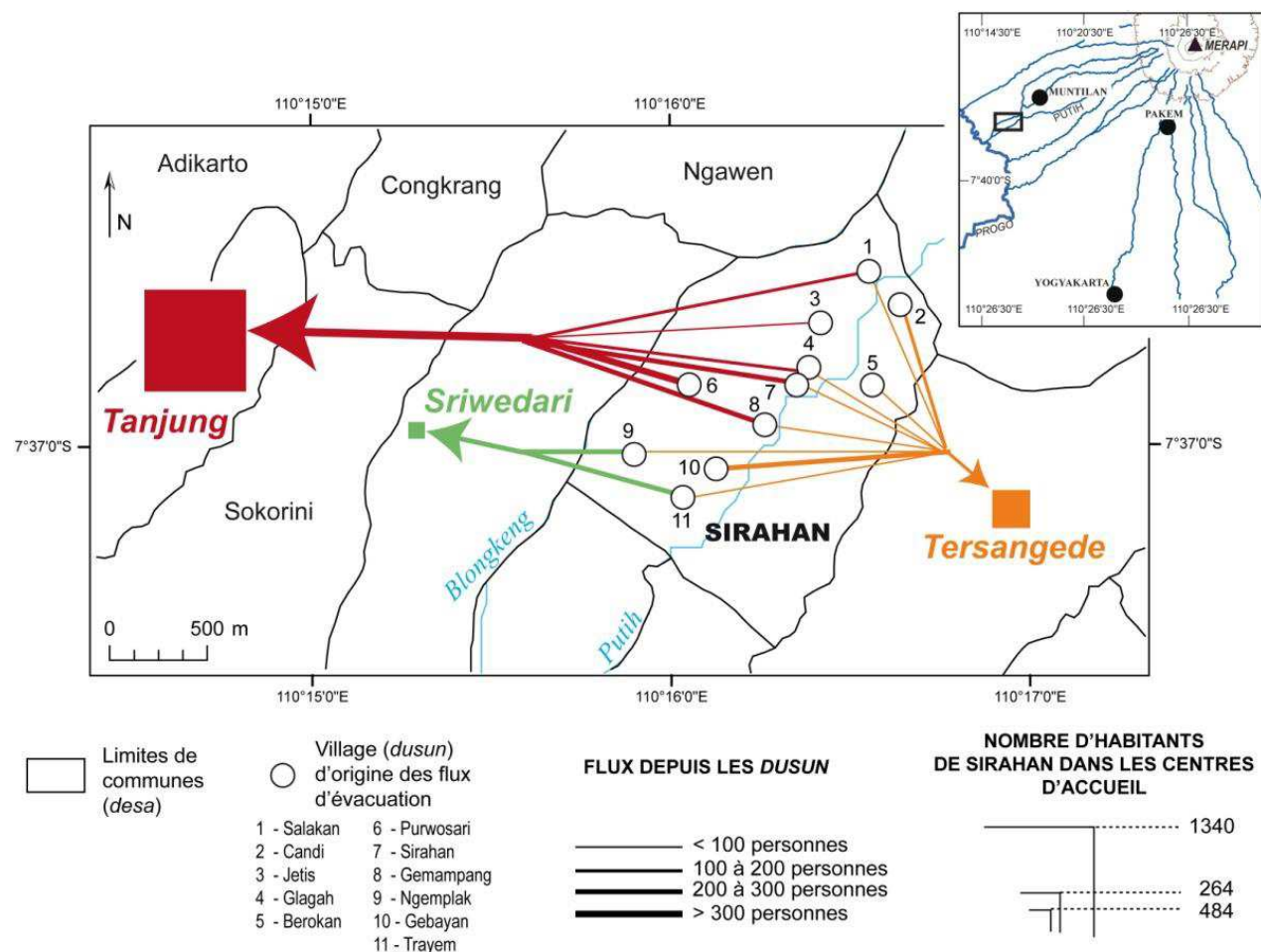


Figure 66 - Les centres d'évacuations accueillant les habitants de Sirahan menacés par les lahars

Tableau 23 – Nombre d'habitants du *desa* Sirahan s'étant rendu au moins une fois dans un centre d'évacuation pendant la saison des pluies 2010-2011

Centre d'accueil	Dusun d'origine	Personnes évacuées		TOTAL
		Hommes	Femmes	
Tanjung	Salakan	87	98	185
	Gemampang	144	137	281
	Sirahan	137	126	263
	Jetis	43	47	90
	Glagah	59	99	158
	Purwosari	204	159	363
Sri Wedari	Trayem	63	72	135
	Ngemplak	62	67	129
Tersan Gede	Candi	72	77	149
	Gebayan	146	136	282
	Gemampang	1	1	2
	Salakan	7	9	16
	Sirahan	8	5	13
	Berokan	1	0	1
	Glagah	0	3	3
	Ngemplak	2	4	6
	Trayem	4	8	12
Total		1040	1048	2088

2. Des infrastructures endommagées

2.1 Les dommages sur les sabo-dam

Les barrages et les ponts enjambant les rivières ont très rapidement été détruits par les lahars. De décembre et à avril 2011, 14 sabo-dams et 21 ponts sur les versants occidental et méridional du Merapi ont été emportés par les lahars, ou bien ensevelis (Figure 68). Les sabo-dams bloquent d'abord les sédiments, puis, remplis, ils sont peu à peu ensevelis par les dépôts successifs. L'exemple du sabo-dam SE-RD5, en amont de Mangunsuko sur la Senowo, en est un exemple typique. Terminé en 2009, il représente le dernier modèle de la technologie sabo, (Pak Manis, entretien, 2010), dans lequel les déversoirs sont plus larges, et ne sont pas fermés par un tablier (Figure 68C et D ; Figure 70). Ce nouveau mode de construction est supposé ralentir le remplissage du barrage, mais est prévu pour des récurrences de lahars qui ne dépassent pas les 4 à 5 événements par an (P. Manis, Proyek Merapi, entretien, 2010). La rivière Senowo ayant subi 13 lahars jusqu'en mars 2011, le barrage s'est retrouvé très vite comblé et endommagé (Figure 68).

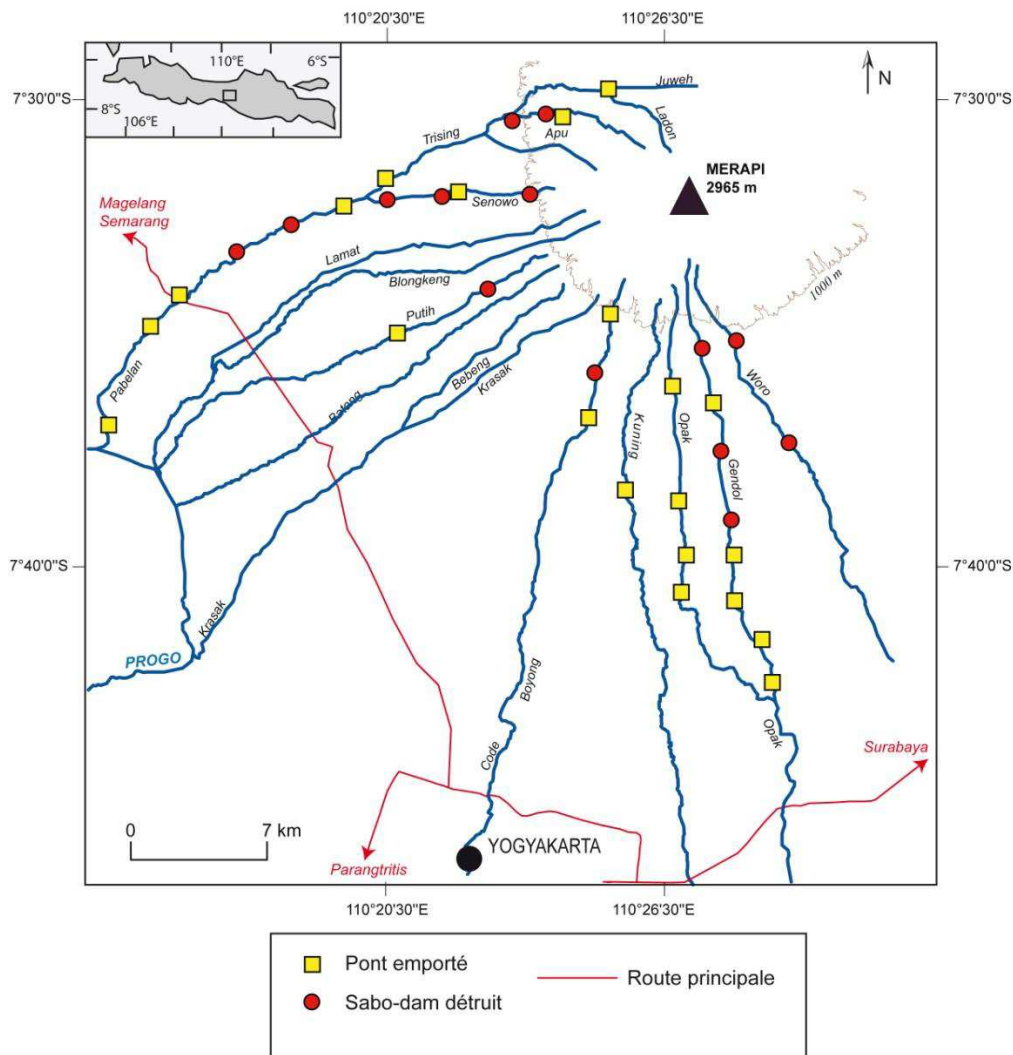


Figure 67 - Sabo-dam et ponts détruits par les lahars



Figure 68 - Les infrastructures endommagées sur le talus proximal de la rivière Senowo.

A et B : le sabo-dam SE-RD5 inauguré en 2009, vu vers l'amont en juin 2010 (A) puis en mars 2011 (B). C et D : le pont aménagé 800 m en aval du sabo-dam SE-RD5 vu en juin 2010 (C) puis en mars 2011 (D). Repérer l'épaisseur des dépôts excédant les 5 m. Clichés E. de Bélizal.



Figure 69 - Modèle de sabo-dam "ancienne" génération, à déversoirs de dimensions limitées. Ce sabo-dam, construit sur la rivière Gendol, au nord d'Argomulyo, a été entièrement recouvert par les dépôts pyroclastiques de novembre 2010. Cliché E. de Bélizal, août 2008.

La fréquence élevée des lahars empêche le curage du barrage, qui en l'espace de trois mois s'est retrouvé entièrement enseveli sous 8 m de dépôts. Cet exemple traduit la limite des sabo-dams, initialement prévus pour briser l'énergie des lahars. Leur aménagement, étudié par Lavigne et Thouret sur la Boyong (2002), est conçu pour des écoulements à moindre récurrence que ceux de 2010-2011. En outre, le sabo-dam SE-RD5 est bâti à 5 km seulement du sommet, sur le talus proximal du volcan, où les dépôts sont à la fois épais et riches en matériel très grossier. La pente élevée augmente l'énergie des lahars, dont l'impact sur le barrage

est particulièrement fort. La durée de vie d'une telle installation est théoriquement de plusieurs années ; le barrage SE-RD5 était prévu pour durer au moins 10 ans. Il n'aura fallu que trois mois pour l'anéantir. L'exemple du sabo-dam SE-RD5 se retrouve sur la plupart des infrastructures similaires bâties en amont sur le talus proximal du volcan, comme sur la rivière Apu, où les barrages ont également été ensevelis en l'espace de quelques semaines (Figure 70). Cette situation pose des enjeux financiers évidents, dans la mesure où les sabo-dams sont nécessaires pour limiter l'étalement en aval des lahars, où leurs conséquences s'avèrent désastreuses. Toutefois, il s'agit de constructions à durée de vie très limitée, mais qui sont également extrêmement coûteuses et qui représentent une part importante du budget alloué à la réparation des dégâts provoqués par les lahars (cf. *infra* III. 1.2.3).



Figure 70 - Le sabo-dam le plus en amont de la rivière Apu, entièrement comblé par les dépôts de lahars de 2010-2011. Situé à 6 km du cratère, construit en 2010, il n'aura été en service que quelques mois à peine. Cliché E. de Bélizal, avril 2011.

2.2 Les dommages sur les ponts et les routes

Les ponts sont détruits par l'incision rapide du lit des rivières par les lahars (Figure 71), mais peuvent aussi être directement emportés par l'énergie du flux. Le 30 mars 2011, le lahar à débit de pointe $Q_p = 1800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a emporté la moitié des ponts jumeaux de Tamanagung (chap. 3), situé sur la route Yogyakarta-Semarang, qui est une quatre-voie structurante dans le réseau routier de l'île de Java. Ces ponts étaient les seuls ouvrages d'art restant au-dessus de la Pabelan, les autres ayant disparu entre décembre 2010 et février 2011 (Figure 71). Pendant les six semaines de réparation qui ont duré d'avril à fin mai 2011, le trafic des bus et des poids lourds était autorisé au compte-goutte pendant la nuit uniquement (à partir de 19h). Pendant la journée, les gros véhicules devaient, pour rejoindre le nord (Magelang puis Semarang), faire le tour du volcan par l'est, ce qui rajoutait de longues heures de trajet. La route Yogyakarta-Semarang, en outre, était fréquemment close au niveau du petit pont avec la Putih comblé dès décembre 2010. Les lahars qui ont suivi ont quasiment systématiquement débordé sur la route, et obligé les autorités à fermer cet axe stratégique pendant plusieurs heures (Figure 72). À 15 reprises entre janvier et mai 2011, la route a été recouverte par les dépôts de lahars, dont le curage prenait parfois toute la nuit. Le 23 janvier 2011, la route a été fermée à 14h en prévision d'un lahar volumineux signalé plus en amont ; celui-ci est arrivé à 14h20, et a coulé pendant plus de 2 heures, laissant derrière lui blocs, graviers et sables sur 2 m d'épaisseur et 500 m de long. Le déblaiement de la chaussée a duré jusqu'à 3h le lendemain matin. Pendant ce temps, l'ensemble du trafic de la quatre-voie est dévié vers les monts Menoreh, situés une dizaine de km plus à l'ouest, sur de petites routes étroites très vite engorgées pendant plusieurs heures (Figure 72). Alors que Muntilan est habituellement à 30 min de Yogyakarta (moto ou voiture), la déviation par les Menoreh ajoutait en moyenne 2 heures de trajet aux automobilistes bloqués sur la quatre-voie Yogyakarta-Semarang. L'engorgement prend très vite des proportions importantes, notamment à cause de la proximité immédiate du temple bouddhiste de Borobudur, qui est l'un des sites religieux les plus visités par les touristes sur l'île de Java (Figure 72). Cette restructuration contrainte du réseau routier sur l'axe principal de la région montre une très grande vulnérabilité des infrastructures aux aléas tels que les lahars, lesquels sont capables de bloquer les flux routiers pendant plusieurs heures.



Figure 71 - Un exemple de pont emporté en amont de Tamanagung sur la Pabelan. Repérer la très forte incision du lit de la rivière par l'action répétée des lahars (-3,8 m en 6 mois et en 9 lahars, soit -40 cm par lahar en moyenne). Cliché E. de Bélizal, mai 2011.

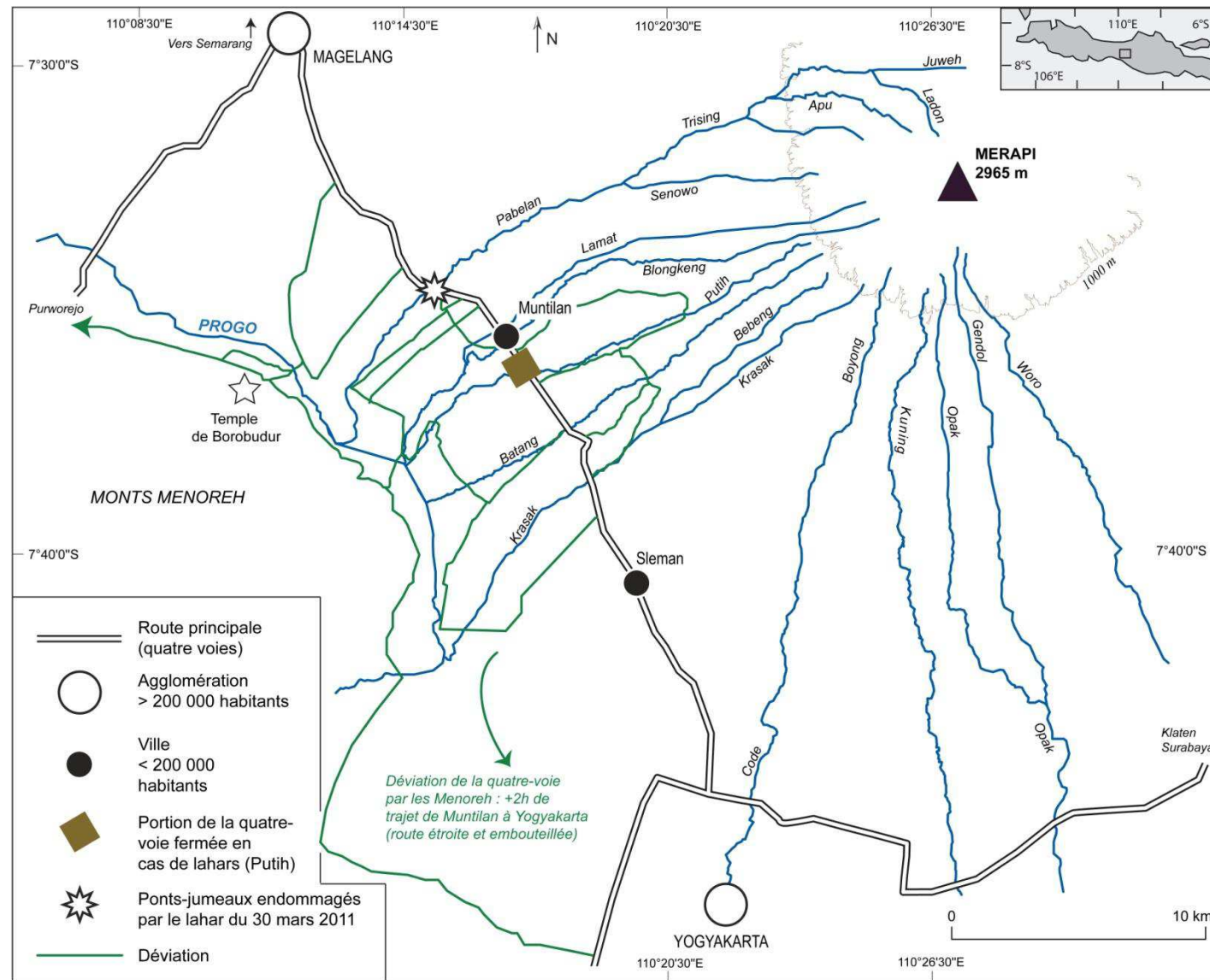


Figure 72 - Les déviations de la quatre-voie Yogyakarta-Semarang (d'après un document officiel du district de Magelang, redessiné et complété)

3. Des ressources menacées

Les premières estimations officielles suggèrent que près de 70 ha de surfaces agricoles ont été ensevelies, principalement dans la Putih. À Jumoyo (Tableau 24), 21 ha de champs ont disparu (soit 60% de la SAU de la commune), principalement des rizières (17 ha), des cultures fruitières destinées aux marchés locaux (piment, fruit du serpent localement appelé *salak*), du bois de construction et des cultures vivrières (manioc, arachides). Le long de la Gendol aval, 4,4 ha de rizières ont été ensevelies principalement à Ngerdi (Figure 73). En quelques mois sont ainsi survenus d'importants changements dans l'occupation des sols des communes fortement touchées par les lahars, et dont les inévitables répercussions socio-économiques sont encore mal connues pour des communautés rurales qui dépendent très largement de l'agriculture.

À ces impacts s'ajoutent les destructions des aménagements liés à l'eau. Dans la partie aval de la Gendol, près de 1 000 m de petits canaux et arroyos aménagés pour l'irrigation des rizières ont été détruits, et 90 puits ont été bouchés. Sur une plus petite échelle, le canal de Mataram, qui alimente en eau le nord de l'agglomération de Yogyakarta pour des besoins sanitaires et agricoles, a subi de fortes diminutions de son débit depuis la fin de l'éruption, à cause de l'ensablement de certaines écluses (Figure 74). La charge en suspension du fleuve Progo qui alimente ce canal semble en effet s'enrichir considérablement après les confluent successifs du fleuve avec les rivières qui drainent le versant occidental du Merapi.



Figure 73 – Exemple de rizières ensevelies à Ngerdi (cliché E. de Bélizal, mai 2011)

Culture	Surface ensevelie (m²)
Rizière	167034
Piment	20455
Arachide	3580
Salak	4750
Manioc	1000
Bois	6350
Bananes	1200
Graines	4500
TOTAL	208869

Tableau 24 - Cultures ensevelies à Jumoyo
(relevé fourni par l'administration de la commune)



Figure 74 - Ensablement du canal Mataram (proximité du confluent avec la Batang).
Cliché E. de Bélizal, janvier 2011.

Processus	Dégâts	Exemples
Défluviation	Villages quasiment entièrement touchés (> 100 maisons) Routes détruites sur de longues distances (> 200 m) Champs ensevelis (grandes surfaces > 4 ha)	Sirahan (Putih) Jumoyo (Putih) Sindumartani (Gendol)
Élargissement du chenal	Villages partiellement touchés (> 20 maisons) Ponts détruits	Pangung (Opak) Villages le long des vallées Apu, Senowo et Pabelan.
Débordements	Villages ponctuellement (< 20 maisons) à partiellement touchés (> 20 maisons). Routes détruites sur de faibles distances (< 100 m) Champs ensevelis (surfaces modestes < 4 ha)	Fréquents dans les villages des parties aval (> 15 km du sommet) des vallées : Pabelan Putih Boyong/Code Opak Gendol

Tableau 25 – Les lahars et leurs dégâts associés – synthèse

La formation des corridors de lahars n'est pas sans incidence pour les populations riveraines. Les impacts socioéconomiques des lahars concernent avant tout les 860 habitations affectées par les lahars durant la première saison des pluies qui a suivi l'éruption de 2010. Avec 3007 personnes directement affectées dont 724 sans-abris, les premiers dégâts atteignent un bilan lourd. Les processus d'endommagement sont multiples, avec les dommages partiels, les destructions (par les blocs) et/ou l'ensevelissement progressif, et concernent une portion plus ou moins large du territoire communal, ainsi qu'illustré par le cas de Sirahan. Jumoyo ou Sirahan sont ainsi presque entièrement détruits, ce qui pose des enjeux d'aménagement cruciaux pour l'avenir d'un espace déjà particulièrement dense. Outre les habitations, les lahars ont détruit des infrastructures provoquant l'isolement momentané, mais très handicapant, de certaines zones de l'ouest du volcan Merapi, et ont enseveli plusieurs champs et canaux. En l'espace de quelques mois, c'est l'ensemble du fonctionnement structurel d'un espace qui a été totalement perturbé : réseaux en restructuration perpétuelle, territoires communaux anéantis, avec des conséquences jouant sur une échelle bien plus vaste. Tous ces dégâts nuisent aux ressources des communautés du Merapi, et peuvent contribuer à augmenter leur vulnérabilité en les affaiblissant davantage. Le tableau de synthèse (Tableau 25) résume pour chaque processus identifié au chapitre 3 les dégâts liés ; les défluviation sont la dynamique la plus dangereuse, mais demeurent rares. En revanche les débordements, plus fréquents, sont spatialement plus restreints, mais peuvent causer des coupures de route particulièrement gênantes. Au terme de cette rubrique, deux rivières apparaissent comme primordiales dans la question des risques liés aux lahars : la Putih et la Gendol, où sont recensés la plupart des dégâts. Pour éviter que la situation n'empire durant les saisons des pluies à venir, il est impératif de pouvoir gérer les risques associés aux lahars et leurs impacts.

III. GÉRER LES RISQUES LIÉS AUX LAHARS ET LEURS IMPACTS : RÉPARATIONS, PRÉVENTION ET SYSTÈMES D'ALERTE

1. Le rôle du gouvernement et des institutions affiliées

La gestion de l'éruption de 2010 a été saluée par la communauté internationale comme étant globalement réussie, puisqu'elle a réussi à s'adapter à la forte intensité des phases éruptives en proposant une délimitation évolutive des zones de danger (Surono *et al.*, sous presse). Toutefois, les autorités gouvernementales n'ont pas mis en œuvre de structure d'alerte et d'évacuation dans les villages (*dusun*) ni même dans les communes (*desa*) exposés aux lahars. Le rôle du gouvernement semble exclusivement cantonné à la reconstruction plutôt qu'à la prévention des dommages provoqués par les lahars. Les acteurs gouvernementaux officiellement chargés de la gestion des lahars sont :

- Le Bureau National pour la Prévention des Catastrophes (*Badan Nasional Penanggulangan Bencana*, BNPB).
- Ministère des Travaux Publics (*Kementerian Pekerjaan Umum* P.U.).
- Les districts du Merapi (*kabupaten* Sleman, Magelang, Klaten, Boyolali)
- Le Proyek Merapi (ProMer), bureau d'ingénieurs spécialisés dans les technologies et ouvrages d'art en milieu volcanique, affilié au bureau de volcanologie (BPPTK) et au gouvernement.
- Le BPPTK (Bureau de Volcanologie) pour l'étude de l'aléa.

Les actions du gouvernement sont essentiellement consacrées à l'entretien des rivières et à la réparation des infrastructures endommagées par les lahars. La rénovation des maisons détruites est également amorcée, notamment à Sirahan, mais le projet de planification n'est pas encore abouti en 2012 et demeure embryonnaire. L'armée, toutefois, peut être envoyée en urgence pour aider à la rénovation de certains villages particulièrement touchés (Jumoyo et Sirahan au lendemain du lahar du 9 janvier 2011, par exemple), mais elle ne joue aucun rôle dans l'évacuation des populations menacées, à la différence des alertes en cas d'éruption du volcan.

1.1 L'entretien des rivières : limiter les impacts des aléas

L'une des premières mesures prise juste après les premiers lahars a été le réaménagement des rivières, et la lutte contre la sédimentation en veillant à creuser les lits et utiliser le sable ainsi récupéré pour bâtir des levées. Les travaux ont été financés par le ProMer, et se sont déroulés dans les rivières Putih, Krasak, Boyong, Kuning, Opak et Gendol dès novembre 2010. Après chaque lahar ayant laissé au moins 1 m de dépôts, une batterie de pelleteuses étaient prêtes à intervenir pour débayer la rivière, afin de limiter le risque de défluvations et de débordements.

Les pelleteuses, pour la plupart, appartiennent au ProMer, et sont utilisés pour le nettoyage des dépôts pyroclastiques sur le talus médial de la Gendol. Toutefois, leur nombre étant insuffisant pour effectuer les travaux de voirie sur l'ensemble des rivières du Merapi, le ProMer engagea des équipes spécialisés dans l'extraction des granulats du fleuve Brantas, qui coule à Surabaya (Pak Manis, comm. orale, 2011). L'investissement se chiffre en centaines de millions de rupiahs (dizaines de milliers d'euros). Sur la Putih, les pelleteuses se dénombrent par dizaines depuis Ngepos jusqu'à Sirahan, et ont travaillé pendant plusieurs mois pour tenter d'inciser un corridor de lahars particulièrement mobile. Ces travaux d'ingénierie civile sont de fait quasi permanents, puisqu'ils sont mis en place en réaction aux écoulements de lahars (Figure 75). Toutefois, dès février 2011 est apparue la volonté de

ne plus seulement réagir, mais également de prévenir, en tentant de fixer artificiellement la forme des chenaux par des enrochements pour limiter les sapements de berges, dans la partie distale de la Putih (Figure 76A), mais aussi dans les parties distales de la Boyong-Code et de la Opak. Certaines portions du chenal de la Putih dans sa partie médiale ont été bétonnées durant l'été 2011 afin de limiter l'érosion latérale par sapement des berges (Figure 77B).



Figure 75 – La lutte contre la sédimentation des rivières sur le talus distal du volcan : incision artificielle des dépôts, création de levées (Putih, 1 km en amont de Jumoyo, cliché E. de Bélizal, mars 2011)



Figure 76 - Enrochements sur les berges de la Putih à 2 km en amont de Jumoyo (A) et (B) bétonnage du chenal sur le talus médial à Srumbung (6 km en amont de Jumoyo)
(clichés E. de Bélizal ,A : avril 2011 ; B : mai 2012)

1.2 La reconstruction des infrastructures

La réhabilitation des zones touchées par les lahars passe en priorité par la reconstruction et la consolidation des axes de communication, et notamment les ponts qui ont été emportés. La réparation s'est déroulée en deux phases : un premier temps de réparations ponctuelles parfois temporaires sur quelques axes majeurs, à la charge des districts pendant le premier semestre 2011 ; ensuite, une entreprise générale de reconstruction de ponts sur l'ensemble du volcan, selon un modèle développé par le Proyek Merapi et financé par le BNPB et le ministère des travaux publics (PU) à hauteur de 160 milliards de rupiahs (13 millions €).

1.2.1 **Les solutions temporaires**

Le pont de Panggung sur la Opak a été emporté le 3 janvier 2011 après avoir été plusieurs jours bloqué par un embâcle (cf. chap. 3, I. 2.2 et Figure 44). Ce pont était situé sur une route qui offrait un axe secondaire est-ouest depuis la commune d'Argomulyo vers Yogyakarta, qui permettait d'éviter un long détour par le nord le long de la route principale de Cangkringan *via* Pakem. Afin de fluidifier le trafic sur la route de Cangkringan, les autorités du district de Sleman ont décidé d'installer un nouveau pont sur la Opak. Des entretiens réalisés auprès des responsables de la mairie d'Argomulyo ont permis de mieux saisir le fonctionnement et le processus de ces travaux. Considérant qu'un modèle similaire au pont précédent serait à la fois coûteux et risqué, il fut décidé d'opter pour un ouvrage temporaire, en attendant que soit stabilisées les rives du chenal de la rivière, particulièrement mobiles (cf. chap. 3, II. 1.2.1). Un nouveau pont de 20 m de long et 15 m de large fut ainsi loué à une entreprise de travaux publics de Surabaya (Java-Est). Le district de Sleman a investi 900 millions de rupiahs (78 000 €) dans le contrat de location pour deux ans d'un pont, acheminé en pièces détachées depuis Surabaya au début du mois de février 2011 et monté sur place par des ouvriers de Java-Est. Les travaux ont débuté le 15 février 2011, et se sont achevés durant la première semaine de mars 2011. Le pont a immédiatement été ouvert à la circulation des deux roues et des voitures uniquement, et ne possède pas de pile située dans le chenal de la Opak, ce qui limite le risque de destruction par la force des lahars (Figure 78). Le tablier, surélevé, est directement posé sur les berges ; les rampes d'accès sont enterrées de chaque côté du pont pour plus de stabilité. Au final, l'ouvrage peut laisser passer des lahars d'une vingtaine de mètres de large et jusqu'à 7 m de profondeur, laquelle n'a jamais été signalée dans cette partie distale de la rivière, et peut supporter un élargissement du chenal de près de 4 m de chaque côté. Les lahars énergiques demeurant très rares dans la Opak, ce modèle de pont demeure une solution temporaire mais efficace qui permet d'améliorer le trafic entre villages. Malgré tout, cette pratique est un cas original sur le Merapi ; aucun autre exemple n'a été relevé à Sleman ou même dans les autres districts. Dans la plupart des autres cas, ce sont les communautés villageoises elles-mêmes qui organisaient des systèmes de passage de fortune pour les deux roues (cf. *infra* III. 3.3).

Dans le cas de Tamanagung (Pabelan), les ponts jumeaux qui surplombaient la rivière avaient été sérieusement endommagés par le lahar volumineux du 30 mars 2011 (cf. chap. 3, I. 2.3.3 ; II. 3.2). L'une des voies du pont ayant été emportée, et ayant ralenti le trafic de manière drastique sur une quatre-voie d'importance nationale, le district de Magelang a financé la consolidation, en quelques semaines, des piliers restants et la reconstruction du tablier qui avait été détruit. Un contrefort métallique fut apposé à l'une des piles du pont, en attendant des travaux de plus grande ampleur.

1.2.2 **Les reconstructions définitives**

Au début de l'année 2012 ont commencé des travaux de réhabilitation de certains ponts. Les travaux devraient continuer pour réparer les ponts emportés dans les rivières du bassin-versant



Figure 77 - Un pont temporaire surélevé au-dessus de la Opak à Pangung. Clichés E. de Bélizal, A : les vestiges du pont emporté en janvier 2011 (vu en février 2011).
B : le nouveau pont (mars 2011).



Figure 78 - Un exemple de pont permanent suspendu au-dessus de la Boyong à Kemiricilik (amont de la rivière, 8 km du cratère).
Clichés E. de Bélizal, A : l'ancien pont emporté par les lahars début 2011 (vu en mars 2011). B et C : structure du pont suspendu (mai 2012).

Pabelan jusqu'en 2013, mais étaient déjà terminés en mai 2012 pour les ponts de Ngepos (Putih) et de Kemiricilik (Boyong). À la différence des travaux menés en 2011 sur la Opak ou sur la Pabelan, cette nouvelle génération de ponts est définitive, et doit pouvoir résister aux lahars. Ils ne possèdent pas de piles centrales situées dans le chenal, et sont situés à 10 m au-dessus du fond de vallée, ce qui les rend hors de portée du flux (Figure 78). Le tablier est suspendu par des câbles d'acier et repose de chaque côté du chenal sur une armature en béton censée retarder l'érosion de la berge. La construction est financée par le Bureau National pour la Prévention des Catastrophes et PU (PU, 2012), selon des standards techniques japonais. Pour limiter l'endommagement de ces infrastructures, notamment à cause du passage répété des camions qui vont et viennent vers les carrières de sables et de blocs aménagées dans les fonds de vallée (cf. partie 3), l'accès est strictement interdit aux poids lourds. Des poutrelles métalliques empêchent le passage des véhicules de grande dimension (Figure 78B).

Outre les ponts réparés, d'autres sont surélevés pour faciliter l'écoulement des lahars et éviter des phénomènes d'embâcles et de débordements, notamment à Jumoyo (Putih). Le Bureau National pour la Prévention des Catastrophes a investi 6,4 milliards de rupiahs (557 000 €) pour rehausser la chaussée de la quatre-voie Yogyakarta-Semarang, et éviter qu'elle ne soit envahie par les lahars, notamment au niveau de Jumoyo (Putih). La buse d'écoulement qui permettait à la rivière de passer sous la route n'avait effectivement pas été calibrée pour laisser passer des lahars, et a donc été transformée en pont de plus grande dimension (5 m de hauteur) à la fin de l'année 2011.

Enfin, les efforts du ministère des Travaux Publics et du Bureau National pour la Prévention des Catastrophes ont permis le déblocage de près de 15 milliards de rupiahs (1,3 million €) pour la rénovation du réseau d'acheminement d'eau potable dans la région de Sleman, permettant à 56 000 personnes d'avoir de nouveau accès à l'eau courante (PU, 2012).

1.2.3 La réparation des sabo-dams : un projet contesté

Les barrages de type *sabo* ont été particulièrement endommagés. Leur présence demeure nécessaire pour briser le flux des lahars et éviter une trop large propagation des écoulements sur le talus distal du Merapi. Un budget de 1,35 milliard de rupiahs (113 000 €) a été alloué par le ProMer pour la réparation et la (re)construction de 77 sabo-dam. Ces coûts risquent d'être revus à la hausse si des lahars continuent de se produire pendant les prochaines années. Toutefois, une telle entreprise demeure contestée par certaines instances scientifiques, notamment les volcanologues du BPPTK ainsi que par des chercheurs étrangers (Lube et Cronin, 2008). Ils accusent notamment les sabo-dams localisés trop en amont de favoriser la désolidarisation des coulées pyroclastiques en bloquant l'avalanche basale et en entraînant une avulsion latérale du panache co-ignimbrique sur les interfluves. En outre, la sédimentation rapide (cf. *supra* II. 2.1) exhausse les chenaux et augmente le risque de débordements sur les interfluves.

1.3 La réparation et la reconstruction des maisons : communautés et gouvernement

À l'inverse des programmes cités précédemment, il n'existait pas en juin 2011 de projet centralisé de reconstruction systématique des habitations endommagées par les lahars, même si les administrations des communes sinistrées laissent entendre que des allocations devraient être allouées aux victimes. En réalité, cette apparente absence d'implication du gouvernement est contrebalancée par le fonctionnement culturel des communautés javanaises, où l'entraide tient une place privilégiée. Le terme de *Gotong Royong* désigne les travaux d'entraide et d'intérêt public très fréquents dans la culture villageoise javanaise. Reconstruire des maisons sinistrées, entretenir des bâtiments publics,

rénover des chemins vicinaux ou des champs de manière collective est une pratique fréquente. Ainsi, le déblaiement et la réparation des maisons endommagées par les lahars (cf. *infra* section 3.3) par l'ensemble du voisinage est monnaie courante ; les dommages partiels sont parfois effacés en quelques jours.

Dans le cas des dégâts irréversibles, nécessitant un programme de reconstruction adapté, la situation est très dépendante des conditions locales. La reconstruction totale de plusieurs dizaines de maisons à l'échelle d'un village (à Jumoyo, Sirahan ou Sindumartani) est un chantier tel que la seule entraide communautaire ne suffit pas. L'attribution de moyens financiers aux populations sinistrées s'avère compliquée, et semble source de conflits entre villages d'une même commune. Les districts distribuent de l'argent, sans que des statistiques ne soient disponibles à l'heure où la thèse est rédigée. À Sirahan, les habitants du village (*dusun*) de Salakan semblaient se plaindre de n'en avoir pas reçu suffisamment. En revanche à Tamanagung, un programme de reconstruction sur un terrain éloigné de la rivière Pabelan avait déjà été entamé quelques jours à peine après le lahar spectaculaire du 30 mars 2011, financé par la commune à partir du mois de mai 2011. Une dizaine de grandes unités bâties en bois étaient destinées à accueillir les 59 personnes sinistrées (Figure 79). C'est la seule entreprise de reconstruction systématique qui a pu être trouvée en juin 2011. Dans toutes les autres communes sinistrées, où le nombre de maisons à réparer était très supérieur à celui de Tamanagung (37 à Sirahan, 66 à Jumoyo, 44 à Sindumartani, 49 à Argomulyo), les sans-abris étaient relogées chez de la famille, des amis, ou dans la mosquée voire dans les anciens centres d'évacuation ouverts lors de l'éruption du Merapi quelques mois auparavant.



Figure 79 - Construction de nouveaux logements pour les sinistrés du lahar du 30 mars 2011 à Tamanagung, rivière Pabelan (cliché E. de Bélizal, avril 2011)

Au final, le coût des réparations des dommages liés aux lahars s'élève à 511,6 milliards de rupiahs (44,5 millions €), selon les sources officielles de PU (2012) pour la seule année 2010-2011. Ce chiffre ne tient pas compte des crédits qui devraient être alloués aux sans-abris pour la reconstruction de leurs maisons, et dont la valeur n'était pas encore connue à l'été 2012.

2. Les structures de la prévention

2.1 Les scientifiques

L'étude des lahars est effectuée en premier lieu par le BPPTK, dont l'un des objectifs, outre le suivi géophysique de l'activité du Merapi, est la réalisation de cartes dites « de risque⁶ ». Celles-ci sont mises à jour après chaque éruption, et représentent la délimitation des différentes zones de danger en fonction de l'extension observée des différents aléas volcaniques (coulées et déferlantes pyroclastiques, retombées aériennes, lahars). Jusqu'en 2010, l'ensemble des rivières du Merapi localisées sous le cône actif appartenaient à la première zone de danger, la moins restrictive. La cartographie de l'aléa demeurait très succincte, et représentait en à-plat jaune les corridors de lahars théoriques (Figure 12). Après l'éruption de 2006, alors que les lahars n'étaient physiquement possibles que dans le sous bassin-versant Gendol-Opak, l'ensemble des rivières du volcan continuait d'être représenté comme des espaces « où les lahars étaient probables », ce qui amenait une perte de signification problématique, la carte ne correspondant absolument plus à la réalité du danger. L'absence de grande catastrophe liée aux lahars au Merapi depuis les années 1970 avait eu tendance à minorer cet aléa au profit des coulées pyroclastiques, qui avaient fait plusieurs dizaines de victimes, notamment en 1994 (Abdurachman *et al.*, 2000) et en 2006 (Charbonnier et Gertisser, 2008). Toutefois, la forte fréquence des aléas dès le début de l'éruption de 2010 a obligé les volcanologues et les géophysiciens du BPPTK à réviser le zonage des lahars, afin de produire des cartes d'aléa qui aient une véritable valeur scientifique et opérationnelle.

À partir de mars 2011, une équipe s'est constituée pour se lancer dans un travail de modélisation systématique de l'aléa lahar dans les rivières du Merapi, en partenariat avec l'Earth Observatory of Singapore (EOS) de l'Université des Sciences et Technologies de Nanyang (Singapour). L'objectif est de produire une série de cartes uniquement consacrées aux lahars, dans la mesure où l'échelle de la carte « de risque » classique se prête assez mal à une représentation suffisamment fine des zones susceptibles d'être touchées. Une série d'une dizaine de cartes au 1/12000 est actuellement en train d'être publiée, notamment centrée sur les parties aval des rivières, pour aider les autorités et les populations locales à s'adapter (Figure 80). La cartographie s'appuie sur des relevés de terrain situant précisément les zones où les lahars ont débordé et pourront déborder ensuite, et représente les extensions probables à l'aide de deux outils de modélisation numérique : LaharZ et Titan 2D. Ces programmes sont utilisés par les géophysiciens à l'aide de données rhéologiques (Titan 2D) ou de seuils de volumes hypothétiques de lahars (LaharZ) (GMFG, 2007 ; Procter *et al.*, 2010) pour produire des cartes d'aléas (Iverson *et al.*, 1998 ; Huggel *et al.*, 2008 ; Muñoz-Salinas *et al.*, 2009). Par des flèches rouges sont indiquées les zones de débordements potentiels, dans des chenaux sinueux où les débordements sont probables, et dans des chenaux rectilignes où la tendance à l'étalement est fréquente. L'intérêt de ce type de document réside également dans l'indication des chemins d'évacuation, censée aider les riverains à prendre les bonnes directions. Naturellement, ces cartes devront être fréquemment actualisées pour s'adapter au mieux aux fréquentes évolutions environnementales. On peut d'ailleurs regretter que les défluviations ne soient pas explicitement représentées : les lits des rivières semblent considérés comme des objets spatiaux statiques, alors qu'au contraire leur forme peut changer rapidement en réponse aux lahars (cf. chap. 3).

Malgré tout, bien diffusées, ces cartes devraient être utiles aux responsables des villages pour être ajoutées au système de surveillance et d'alerte spontanées qui existe déjà pour mieux protéger

⁶ Le terme indonésien inclut cette notion de « risque » dans le titre de cette carte qui, en réalité, ne représente pas le « risque », mais uniquement l'extension probable des aléas d'après les observations tirées de l'éruption la plus récente.

leurs administrés (cf. *infra*, III. 3). La réalisation de tels documents est nécessaire pour que la prévention soit ajustée à un aléa mieux compris et mieux délimité, afin de pouvoir mettre en œuvre par la suite une préparation suffisante pour limiter à l'avenir les effets de surprise grâce à des scénarios probants (De La Cruz-Reyna *et al.*, 2000).

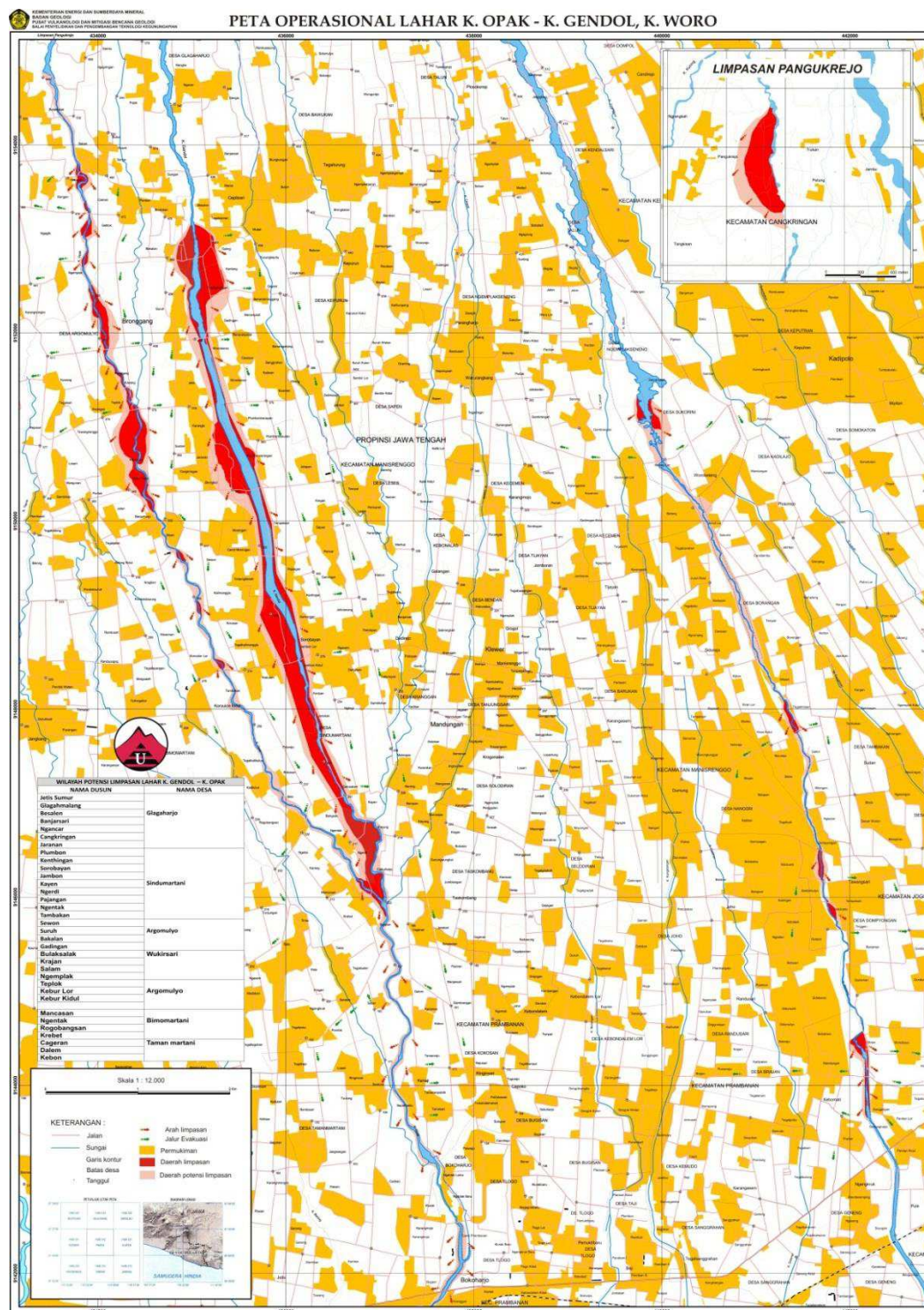


Figure 80 – Carte d'aléa du BPPTK consacrée aux lahars. Rouge : débordements avérés. Rose : débordements probables. Flèches rouges : sens du débordement. Flèches vertes : voies d'évacuation. L'à-plat bleu est d'une signification confuse, puisqu'il symbolise à la fois le lit mineur (fleuve Opak après le confluent), mais aussi les corridors de lahars (Opak et Gendol avant le confluent, Woro). BPPTK, octobre 2011.

Les membres du BPPTK complètent d'ailleurs leur action par des réunions d'information auprès des communautés locales pour assurer la diffusion de leurs cartes « de risque » et en expliquer la lecture. Ils travaillent en partenariat avec des universitaires indonésiens, de l'université Gadjah Mada notamment (UGM), sur des questions de cartographie systématique des dommages, avec pour objectif une évaluation quantifiée des différents niveaux de destruction. Les partenariats internationaux concernant les lahars sont appelés à se développer, notamment dans le cadre du projet SEDIMER (voir « Conclusion générale »).

2.2 ONG et associations dans le prolongement de l'éruption

Durant l'éruption de 2010, les communautés du Merapi ont été encadrées non seulement par les autorités, mais également par des ONG et des associations de volontaires qui ont aidé aux évacuations et au sauvetage des blessés. Certaines de ses structures non gouvernementales ont continué leur action de surveillance et d'information des populations, car aucun système d'alerte officiel ne permet d'avertir les riverains depuis que les sirènes ont été détruites par l'éruption. De grandes organisations telles que Oxfam ou la Croix Rouge sont présentes et distribuent nourriture, eau potable tout en aidant à la reconstruction de certaines maisons. Le propos, toutefois, s'intéressera surtout aux ONG locales, consacrées quasi-exclusivement au Merapi.

2.2.1 Les ONG

- Jalin Merapi

La gestion de l'aléa lahar est essentiellement réalisée par l'ONG indonésienne Jaringan Informasi Lingkar Merapi (Réseau d'Information du Merapi), résumée en Jalin Merapi. Cette ONG est née en 2006 à l'initiative de trois radios communautaires situées dans les districts de Klaten (Lintas Merapi FM), de Boyolali (MMC FM) et de Magelang (K FM), désireuses de fournir une information en temps réel sur les conditions du volcan. Elle a joué un rôle primordial lors de l'éruption de 2010, grâce à l'envoi de brèves concernant l'évolution des phases éruptives et leur gestion *via* des émissions de radio, mais aussi par l'envoi de SMS, et par l'utilisation des réseaux sociaux Facebook et Twitter accessibles à un très large public, la plupart des Indonésiens possédant des téléphones mobiles 3G. En 2011, les radios Lahara FM (Magelang) et Gema Merapi FM (Sleman) rejoignent le réseau Jalin Merapi. Son site internet (<http://merapi.combine.or.id>) s'enrichit par la publication des *tweets* des usagers et par la diffusion en direct des images enregistrées par les caméras de surveillance installées par le BPPTK. Des hydrogrammes et des sismogrammes en temps réel sont également accessibles, et permettent aux usagers de suivre l'évolution des conditions géophysiques du volcan. Les rapports d'activité rédigés par le BPPTK sont également disponibles en ligne. Même si le temps de chargement des vidéos demeure long et que l'image est de qualité moyenne et saccadée, l'idée de réunir sur un seul site internet l'ensemble des informations sur le Merapi est un moyen de communication particulièrement intéressant, tirant parti des moyens médiatiques utilisés par une grande partie de la population (voir commentaire de la page d'accueil du site internet en annexe B.2). Il demeure toutefois difficile de contrôler l'exactitude de certaines données ; le site étant inféodé aux réseaux sociaux et conçu comme un moyen d'échange libre, il n'y a aucun contrôle en amont de ce qui est annoncé.

Jalin Merapi distribue également des postes de radio et des talkie-walkies aux personnes chargées de la surveillance des lahars dans les villages riverains des rivières (cf. *infra* 3. 3.1). Ce support technique joue un rôle déterminant dans la gestion de l'aléa.

- **Pecinta Alam**

L'autre principale ONG qui joue un rôle prépondérant dans la prévention des lahars et dans la réduction des risques est Pecinta Alam (littéralement « Les Amis de la Nature »). Les Pecinta Alam ont contribué aux évacuations pendant l'éruption en accompagnant les autorités, et en coordonnant des équipes de secours venues récupérer les victimes. À peine l'éruption achevée, leur engagement s'est poursuivi pour aider les communautés locales à surveiller d'elles-mêmes les conditions des rivières à travers le groupe « Kabar Sungai » (« les nouvelles de la rivière »), qui compte une dizaine de membres actifs, jeunes professionnels ou étudiants. Tandis que Jalin Merapi a surtout un rôle de collecte et de publication d'informations générales sur le Merapi, Kabar Sungai est davantage orienté sur des opérations de terrain, alliant rencontres avec les populations locales et surveillance des rivières.

Dès la fin de l'éruption, Kabar Sungai s'est inquiété du risque de lahars susceptibles d'atteindre Yogyakarta, et a mis au point 16 centres de surveillance pour établir un relai d'information depuis l'amont de la Boyong jusqu'au centre-ville de Yogyakarta. Sur chaque site de surveillance a été représentée sur des éléments fixes une échelle permettant de donner la profondeur des écoulements. Les responsables, nommés parmi les riverains, sont chargés de surveiller les conditions de la Boyong (et de la Code, plus en aval) ; ils doivent notamment remplir une fiche de contrôle renseignant la profondeur du flux, mais aussi ses caractéristiques dynamiques : présence de blocs, couleur, vitesse approximative. Les données de chaque point d'observation sont ensuite transmises en aval, et permettent aux habitants de Yogyakarta d'être avertis à l'avance de l'occurrence d'un lahar, selon le modèle de relai d'information qui s'est mis en place (cf. *infra* 3. 3.1).

Parallèlement à la mise en place de sites de surveillance, Kabar Sungai organise des réunions d'information à l'échelle du RW (quartier), dans les *dusun* (villages) ou à Yogyakarta. Les séances sont l'occasion de diffuser des enregistrements de lahars pour familiariser ceux qui n'en n'auraient jamais vu. Les conditions de déclenchement sont également expliquées, et des conseils en cas d'évacuation sont prodigués (annexe B.1). Ces derniers sont indispensables pour des populations urbaines qui n'ont jamais eu à subir les aléas du Merapi, puisque Yogyakarta est située en-dehors du périmètre d'extension des aléas volcaniques éruptifs. Enfin, des flèches sont affichées pour guider les évacuations en cas d'urgence, en partenariat avec les habitants (Figure 81).



Figure 81 - Les habitations de Gondomanan (rive droite de la Code dans le centre de Yogyakarta) mis à contribution par les membres de l'association Pecinta Alam pour le balisage communautaire des chemins d'évacuation en cas de lahars (cliché E. de Bélizal, février 2011)

Les ONG jouent un rôle structurant dans la diffusion de l'information et des alertes, et cherchent à aider les communautés locales à gérer elles-mêmes les aléas qui les menacent, à les comprendre, à les anticiper, à s'en protéger. En ce sens, l'éruption de 2010 a été déterminante, puisqu'elle a permis à ces ONG de saisir l'importance de la communication et de l'aide à la décision pour les populations menacées. L'éruption a ainsi été le laboratoire d'une expérience de gestion qui a pu ensuite être appliqué aux lahars.

2.2.2 Les associations et initiatives parallèles

Des associations de riverains se sont également organisées à l'échelle de quelques dizaines de foyers, notamment sur le talus distal du volcan où les lahars ont été rares pendant plusieurs décennies. Un exemple est la Komunitas Kali Boyong Selatan (Communauté du sud de la Boyong). Cette association invite des spécialistes, des universitaires, des ingénieurs, des ONG pour savoir comment se protéger. Des thématiques annexes comme la disponibilité en eau, l'impact des lahars sur les écosystèmes locaux, l'intéressent également. Mise en place après l'éruption, le 19 décembre 2010, elle compte 6 membres bénévoles, qui jouent un rôle d'information auprès des riverains de Jongkang Baru, *dusun* situé dans le nord de l'agglomération de Yogyakarta, qui connaissent très mal les lahars. Aucun site de surveillance n'ayant été installé chez eux par Kabar Sungai, ils ont créé le leur en louant du matériel de radio à Jalin Merapi. Ils participent également à des opérations de déblayage et de réparation lorsqu'un village est durement touché par un lahar (Sirahan en janvier 2011, Panggung et Teplok en mars 2011). Le financement de l'association est assuré par les membres, mais aussi par la paroisse catholique de St. Alphonsus localisée au nord de Yogyakarta. Celle-ci, notamment, organise des collectes pour aider les victimes des lahars. L'exemple de KKBS n'est pas un cas isolé. À Sirahan, dans la partie aval de la Putih, un groupe de jeunes a réalisé un film sur les dégâts qu'a subis le village, et dont les bénéfices de la vente ont permis d'acquérir des téléphones portables pour ceux qui n'en avaient pas ou plus, afin de faciliter les échanges d'information concernant les lahars.

On demeure surpris, toutefois, que ces petites associations demeurent assez indépendantes les unes des autres. KKBS, pourtant située sur la Boyong, ignore l'action de Kabar Sungai. En dépit de plusieurs initiatives d'informations et de communication, il semble que cette dernière ne se fasse pas toujours de manière optimale entre les différents acteurs de la prévention. Ce fonctionnement cloisonné d'une multitude de groupes complexifie la manière dont se fait la prévention des lahars, et empêche une harmonisation et une éventuelle vérification des informations échangées pour plus d'efficacité encore.

3. La gestion du risque par les communautés : relais d'information et système d'alerte

Dans ce cadre d'échange rapide d'information, la surveillance des lahars est facilitée, et rend possible la mise en œuvre d'un système d'alerte communautaire pour pallier le matériel public défectueux. Les sirènes ont été largement remplacées par les téléphones portables, dans un mode de gestion du risque *bottom-up* communautaire et particulièrement efficace.

3.1 Un contexte culturel favorable

La surveillance des rivières par les bénévoles est rendue possible d’abord par le mode d’organisation traditionnel des unités territoriales javanaises. Que ce soit à l’échelle du *dusun* (village) en milieu rural, ou celui du quartier en ville, il est d’usage pour quelques équipes de volontaires d’assurer, en continu, la surveillance. Il s’agissait à l’origine d’avertir la communauté d’un danger avéré ou potentiel (irruption d’animaux sauvages, arrivée d’un étranger, aléa naturel). Aujourd’hui, les *pos kamling* sont de petites guérites ou de petites cabanes sur pilotis dans lesquelles deux ou trois personnes effectuent une mission de vigile plus symbolique qu’effective. Cette persistance d’une tradition de surveillance trouve désormais une application pratique dans la gestion de l’aléa lahar. Sur le modèle des *pos kamling*, sont installés à proximité des rivières des abris de toiles ou de bambous (Figure 82) destinés à accueillir des équipes de deux ou trois volontaires, les *posko*. Ceux-ci observent les conditions de la rivière, et avertissent les riverains en cas d’alerte, selon le modèle de vigie traditionnel. Les surveillants peuvent être de jeunes étudiants ou de jeunes actifs au chômage, qui combinent leur bénévolat à de petites rémunérations (dans la Opak ou la Gendol notamment) : aménagement d’un gué payant pour motos au cas où un pont emporté n’aurait pas été reconstruit, contrôle et péage à proximité d’un site d’extraction de matériel volcanoclastique (voir chap. 6 et 7). D’autres en profitent pour ouvrir une petite échoppe (Boyong, Putih). La quasi-totalité des surveillants sont des « LINMAS » (agents de sécurité d’un village), ainsi que des « SAR » (*Save And Rescue*), d’anciens jeunes bénévoles qui ont aidé les autorités lors des évacuations pendant l’éruption.

3.2 Fonctionnement des relais



Figure 82 - Le posko de Panggung (Opak), une construction sommaire à proximité de la rivière.

(Cliché E. de Bélizal, février 2011)

Outre ce cadre culturel propice à la surveillance volontaire des rivières, le contexte technique apparaît également décisif. Grâce à l’action des ONG ou de quelques associations, les *posko* ont pu s’équiper en radios et talkie-walkies. Mis en relation avec la radio de Jalin Merapi, ils obtiennent en temps réel des informations sur l’évolution des conditions météorologiques sur le talus proximal du volcan.

Avec leurs émetteurs radio, les observateurs sont également liés à la fréquence radio des

sismomètres situés tout autour du volcan. En cas de fortes pluies, la vibration du sol produit un son grave à basses fréquences : les observateurs savent ainsi qu’un lahar est probable, et ils se préparent à donner l’ordre d’évacuer. Une telle organisation peut être trouvée sur presque toutes les rivières, et

principalement sur la Putih, la Boyong, la Opak et la Gendol, où de nombreuses stations de vigie ont été construites d'amont en aval. Ainsi, les habitants situés dans les zones où des débordements sont à craindre peuvent être avertis au moins 15 à 30 minutes avant l'arrivée de la coulée de boue, et le temps d'évacuer. Les postes situés en amont sont presque uniquement dédiés à la surveillance de la rivière, tandis que les *posko* de l'aval ont également pour objectif d'émettre l'alerte et de donner l'ordre d'évacuer si nécessaire.

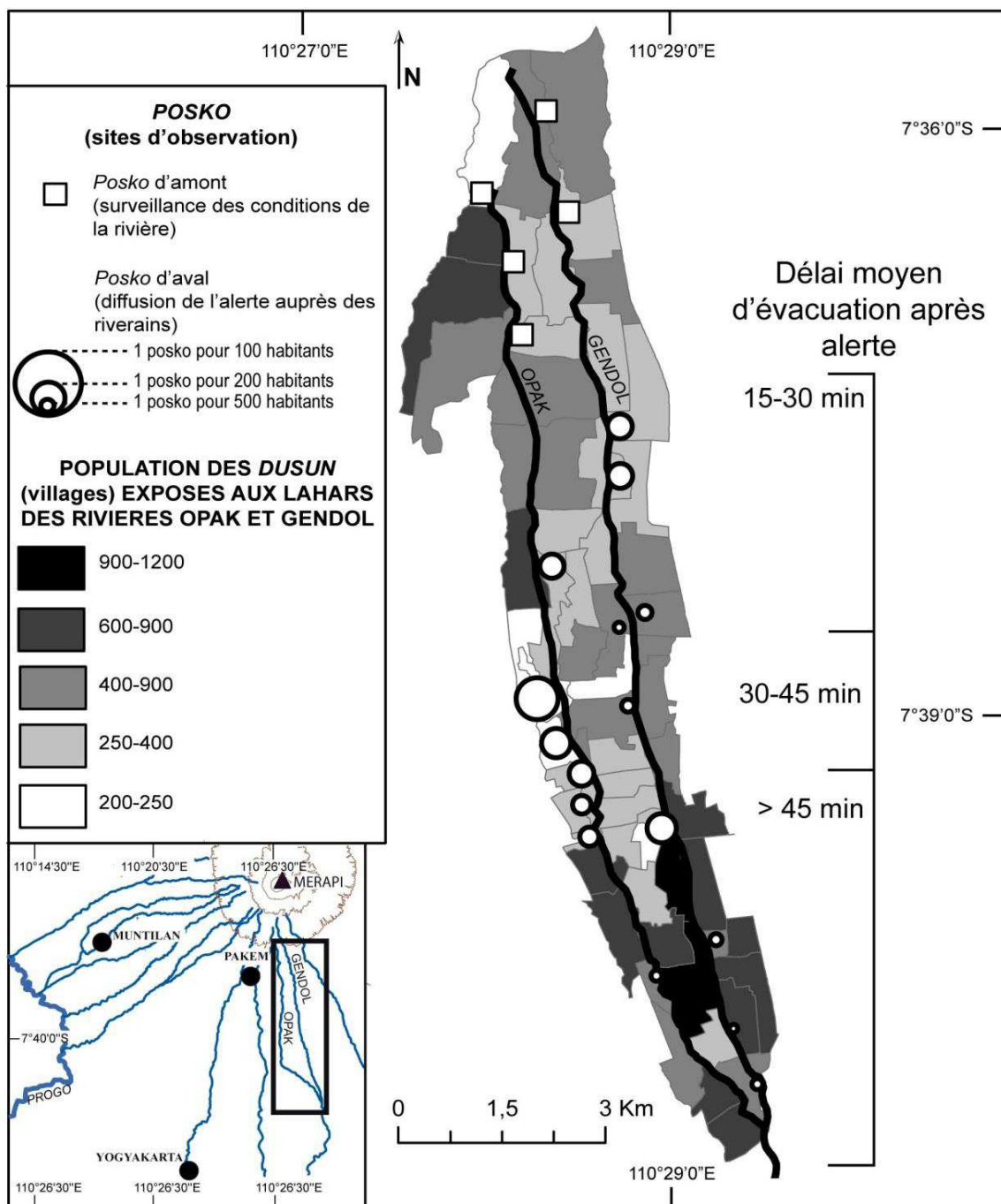


Figure 83 - Organisation et répartition des posko le long des vallées Opak et Gendol

La répartition spatiale des *posko* n'est pas régulière (Figure 83). Certaines zones, notamment dans la Opak, sont particulièrement bien pourvues, tandis que d'autres n'en possèdent pas. Les villages (*dusun*) les plus peuplés dans la partie aval des rivières Opak et Gendol, à proximité de leur

confluent, sont étonnamment peu couverts par le réseau de surveillance. Quand ils le sont, il n'y a généralement qu'un seul poste de surveillance et d'alerte pour plus de 500 habitants. Cette répartition s'explique par la situation assez loin en aval de ces villages. Le délai entre le moment où le lahar est signalé à l'amont et le moment où il arrivera en aval étant en moyenne supérieur à 45 min, la situation peut sembler moins urgente comparée aux sites où le temps d'évacuation est plus réduit, et où la surveillance nécessite d'être accrue.

3.3 Aperçu des différents systèmes d'alerte

Lorsqu'un lahar est signalé en amont, les surveillants ont au moins 15 min pour exiger des riverains qu'ils s'éloignent des abords des rivières. Les villages réellement menacés par les lahars se situent cependant plutôt dans la partie aval des cours d'eau, là où le réseau hydrographique n'est plus encaissé. La plupart des *posko* disposent ainsi d'au moins 30 min pour lancer l'alerte et l'ordre d'évacuer. L'alerte est donnée de deux manières :

3.3.1 **Le signal sonore**

Le signal sonore est destiné aux personnes présentes dans les sites d'extraction aménagés dans les dépôts volcanoclastiques situés dans les corridors de lahars (chap. 6 et 7). Il peut être donné à l'aide d'un sifflet (dans la Gendol ou la Putih), ou au moyen d'un *kentongan* (dans la Boyong par exemple). Il s'agit d'un gong en bambou très présent dans la tradition javanaise, et qui fait d'ailleurs partie de l'outillage habituel des *pos kamling*. Ce moyen d'alerte est très codifié, et semble n'avoir jamais été entièrement supplanté par les sirènes qui équipaient autrefois le Merapi (Figure 84). Le signal d'un *kentongan* s'entend à plus d'un kilomètre à la ronde, et la plupart des riverains savent en décrypter le message. Il s'agit d'un outil traditionnel de communication entre villages (*dusun*) qui trouve une nouvelle raison d'être au service de la gestion des risques. L'avantage de ce signal est qu'il possède une signification culturelle ancrée dans les représentations javanaises, ce qui limite grandement les risques de fausses alertes ou de malentendus, identifiés comme des facteurs de réaction inappropriée à une alerte (Anderson, 1969).

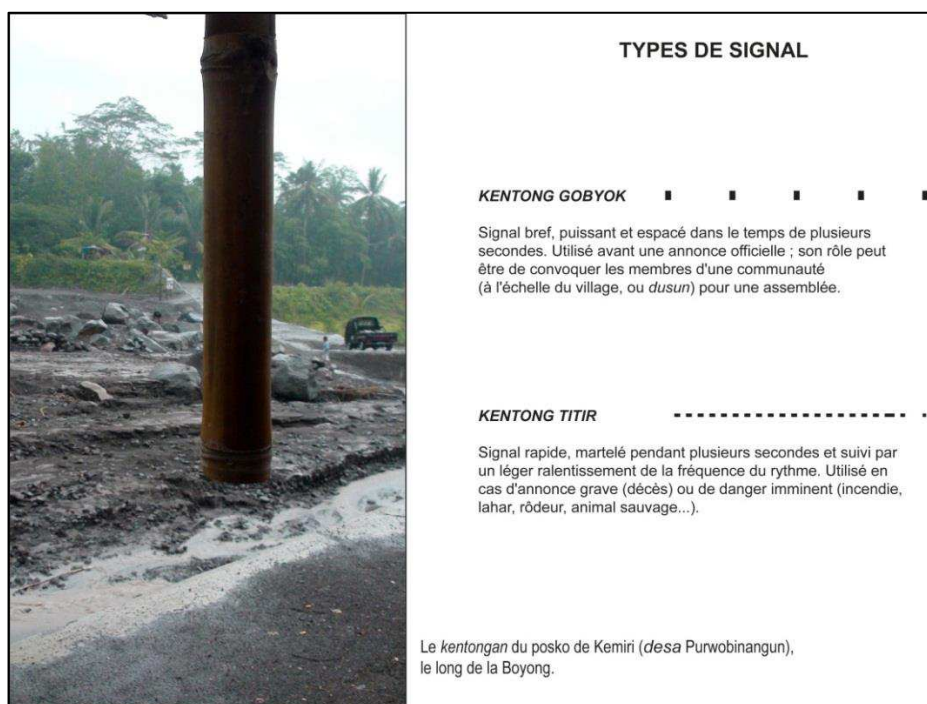


Figure 84 - Le kentongan : exemple de signaux et explication (cliché E. de Bélizal, avril 2011)

3.3.2 Téléphones et porte à porte

Pour avertir l'ensemble des personnes qui possèdent des habitations trop proches des rivières, les membres des *posko* envoient des messages par SMS ou téléphonent directement aux habitants et/ou aux chefs de quartiers qui vont eux-mêmes demander en personne aux personnes menacées d'évacuer. Le terme d'évacuation lui-même semble d'ailleurs un peu abusif, surtout au Merapi où il fait avant tout référence aux importants flux de déplacements encadrés par un gouvernement qui clôt officiellement certaines zones du volcan (Mei et Lavigne, 2011). Dans le cas des alertes en cas de lahars, il s'agit surtout pour ceux qui travaillent ou vivent à proximité des rivières de se mettre à l'abri quelques centaines de mètres plus loin, en restant, le plus souvent, dans les limites du village. Les biens de valeurs qui peuvent être transportés sont mis à l'abri, notamment le bétail, amené vers les terrains de voisins moins exposés aux lahars.

L'ensemble des responsables de *posko* et des dirigeants de villages rencontrés expliquent que toutes les maisons menacées sont vides lorsqu'arrive un lahar. Cette apparente facilité d'un processus d'évacuation souvent considéré comme complexe, ne serait-ce qu'au Merapi (Laksono, 1988 ; Lavigne *et al.*, 2008 ; Texier *et al.*, 2009 ; Dove, 2010 ; Mei et Lavigne, 2011 ; Mei et Lavigne, 2012), est due d'abord à l'aspect très restreint du déplacement dans l'espace et dans le temps. Il ne s'agit pas d'abandonner sa maison pour vivre pendant une durée indéterminée dans un centre d'accueil (à part si la maison est démolie, comme à Sirahan), mais simplement de se rendre chez des proches dans un contexte déjà connu et maîtrisé, celui du village. Une fois le lahar terminé, à peine 1 à 2 heures après le passage du front, le retour est possible. En outre, l'alerte est donnée d'une manière quasi-personnelle, parfois au porte à porte, sans le déploiement des camions de force de l'ordre, certes nécessaire en cas d'évacuation massive, mais toujours impressionnant voire inhibant (De Bélizal *et al.*, 2012). C'est donc grâce à son échelle spatiale et temporelle réduite que le système d'alerte et d'évacuation, organisé par les communautés locales pour se prémunir contre les lahars, fonctionne : l'aléa, parce qu'il est bref et généralement peu étendu, peut-être évité dans le microcosme rassurant du *dusun*, sans besoin immédiat d'une ingérence extérieure. La communauté est ainsi capable de maîtriser le risque.

Cette dimension réduite est visible dans l'exemple suivant, étudié lors du lahar du 22 mars 2011 à Panggung et Teplik, dans la Opak. Le lahar a été rapporté dès 13h30 grâce aux *talkie-walkie* et aux radios du poste de surveillance du village (Figure 85). Le message a été transmis directement ou par SMS à la plupart des habitants ; l'un des quatre surveillants du *posko* de Panggung s'est rendu dans chaque maison proche de la rivière pour inciter les gens à s'éloigner. Ceux qui vivent trop près de la rivière, ceux qui sont malades ou âgés ont été transportés par les motos ou par les voitures des voisins vers les maisons situées au moins 500 m à l'ouest du chenal. Trente minutes plus tard, le front du lahar est arrivé et a endommagé 23 maisons à Panggung (14h00) puis une seconde pulsation à 14h20 a inondé la mosquée (Figure 85) et a détruit 6 habitations dans les *dusun* voisins de Teplik et Kliwang. À la suite de quoi, craignant des inondations plus intenses, les habitants qui restaient ont décidé de sauver quelques objets et meubles (Figure 86), tandis que d'autres évacuèrent le bétail vers les champs plus éloignés de la rivière. Enfin à 16h00, le débit a diminué rapidement, et le nettoyage des maisons a immédiatement commencé. Les personnes qui avaient évacué sont rentrées chez elles au crépuscule (vers 18h00). Le lendemain, des volontaires SAR (*Save and Rescue*), accompagnés par la Croix Rouge et l'armée, venus de Yogyakarta et de Semarang, ont aidé les habitants à effectuer les travaux de réparation, si bien qu'au bout de quelques jours, la plupart des dépôts de boue dans les roues et dans les maisons faiblement impactées avait entièrement disparu (Figure 85 et Figure 87). Durant le temps de nettoyage des 23 maisons qui ont été inondées par le lahar, les habitants étaient logés chez des voisins.

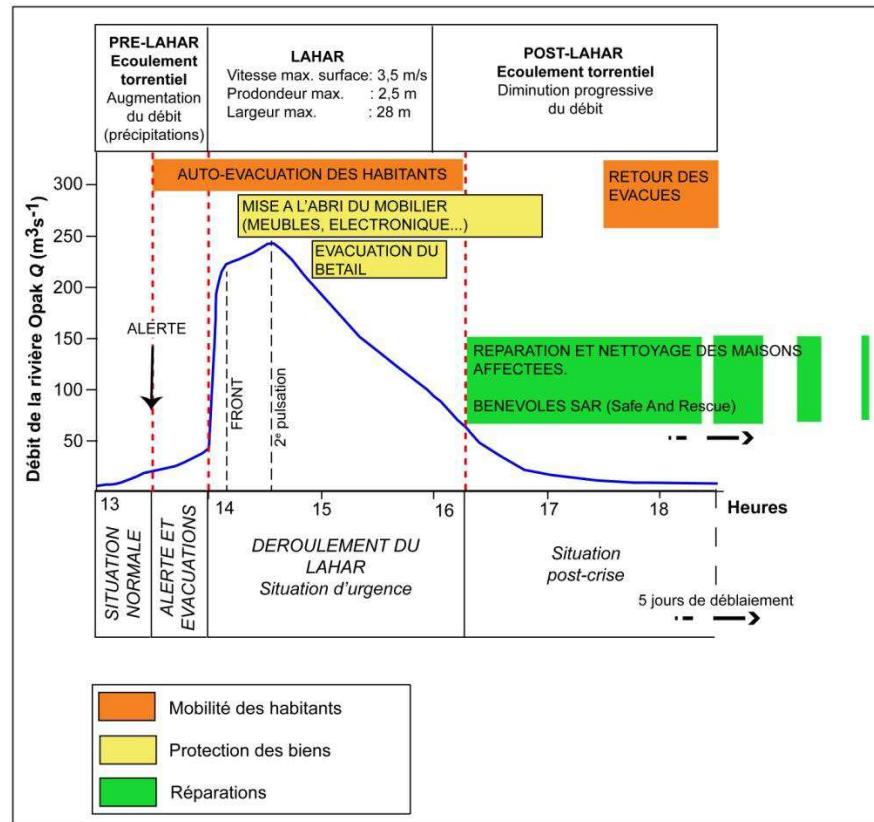


Figure 85- Évacuation en période de lahar à travers l'exemple du lahar du 22 mars 2011 à Panggung, rivière Opak. Les trois clichés représentent la mosquée du village (A) en début d'après-midi avant le lahar (remarquer la présence de sacs de sables). (B) pendant le lahar vers 15h30 (remarquer l'écoulement boueux et la *mudline* laissée par la seconde pulsation de l'événement à 14h20 ; la rivière coule derrière les arbres du dernier plan). (C) le lendemain, pendant la phase de déblaiement. Clichés E. de Bélizal (mars 2011).



Figure 86 – Mobilier mis à l'abri. Après le passage du front qui a endommagé plusieurs maisons à Panggung (Opak), les habitants du village voisin de Teplok ont sorti les meubles des maisons, et les ont abrités sous leurs vérandas. Cela permet de faciliter le déblaiement de la maison au cas où celle-ci serait inondée.

Cliché E. de Bélizal (mars 2011)



Figure 87 – Réparation des dégâts. Au lendemain du lahar du 22 mars 2011 de la Opak qui a débordé à Panggung et Teplok, la communauté villageoise répare les dégâts, aidés par les bénévoles SAR (uniforme orange), la Croix Rouge indonésienne (PMI, Palang Merah Indonesia, photo B) et l'armée. Les routes (A) et les maisons (B) sont déblayées. Clichés E. de Bélizal, mars 2011.

Tableau 26 - Surveillance de l'aléa "lahar" et gestion des risques liés, tableau de synthèse

		AVANT LE LAHAR (préparation)	PENDANT LE LAHAR	APRÈS LE LAHAR (réparation)
INSTITUTIONS	GOUVERNEMENT national (BNPB, PU...)			Reconstruction de ponts permanents Rénovation des routes Rénovation des infrastructures hydrauliques
	GOUVERNEMENT local			Construction de ponts temporaires Maisons pour population sinistrée (Tamanagung)
	ProMer	Entretien des rivières Construction de sabo-dams		
SCIENTIFIQUES	BPPTK	Carte de « risques » au 1/12000 Surveillance des rivières Information, communication		
	UNIVERSITAIRES	Étude de l'aléa Étude de la vulnérabilité		Bilan de dégâts
ORGANISATIONS	ONG	Information, communication Encadrement des communautés locales Support technique	Aide aux évacuations et aux alertes dans les villages menacés Information, communication	Aide matérielle et financière à la réparation
	ASSOCIATIONS	Information, communication	Aide aux évacuations et aux alertes dans les villages menacés	Aide matérielle et financière à la réparation
POPULATIONS LOCALES		Surveillance des rivières Information, communication	Gestion du système d'alerte Évacuation des populations exposées Mise à l'abri des biens Information, communication	Aide matérielle à la réparation. Recherche de fonds pour les populations sinistrées

Alors que les dégâts liés aux lahars ne cessaient de s'alourdir durant la saison des pluies 2010-2011, gouvernement, scientifiques, ONG et communautés locales se sont organisés pour tenter d'en limiter les impacts et de reconstruire au plus vite un espace bouleversé. Le tableau de synthèse (Tableau 26) reprend les informations exposées dans cette rubrique. Le gouvernement a débloqué un très important budget de 44,5 millions € pour effectuer les restaurations et améliorations d'infrastructures ; les scientifiques et ingénieurs du bureau de volcanologie (BPPTK) publient des cartes d'aléa fondées sur des modèles à haute résolution ; les ONG et nombre de particuliers s'organisent pour surveiller les rivières et donner l'alerte pour éviter que certaines personnes ne soient prises au piège. Un relai d'information efficace s'est développé sur la quasi-totalité des rivières du volcan, permettant de prévenir à temps les populations. Ce système de gestion mis en place par les communautés locales se révèle efficace, grâce à un contexte doublement favorable : (1) le matériel de radio-transmission, concédé ou loué par les ONG à des associations de villageois ; (2) un réseau d'information sur le Merapi efficace développé pendant l'éruption ; (3) une culture de l'entraide communautaire très développée dans les villages du Merapi. Cette structure traditionnelle de solidarité permet à la plupart des maisons partiellement endommagées d'être rapidement remises en état par l'entraide communautaire nommée Gotong Royong. En revanche, elle ne permet pas la restauration entière des habitations entièrement détruites ou ensevelies, qui nécessite des crédits gouvernementaux et des aides qui tardent à s'organiser, quand bien même il s'agit d'un élément primordial. Si les personnes sont bien protégées, les maisons, elles, ne le sont pas. Les incisions artificielles du lit des rivières, les levées de sacs de sable construites à la hâte par les riverains ne suffisent guère à canaliser le flux d'un lahar. Le bilan humain des lahars est faible grâce à une gestion efficace des risques ; mais les dégâts économiques qui ont été entraînés dès la première saison humide sont élevés et risquent d'augmenter en cas de poursuite des lahars pendant les années à venir.

Après la présentation de l'événementiel des lahars et la formation des corridors de lahars (chap. 3), le chap. 4 en a exposé les conséquences sociales et économiques. Issus de méthodes d'enquêtes qui associent mesures de terrain, entretiens auprès de responsables et questionnaire systématique adressé aux personnes exposées, les résultats développés dans ce chapitre ont été complétés par des données provenant de rapports officiels (recensement des dommages, notamment) et de littérature scientifique (vulnérabilité). L'apport de ce chapitre a été de montrer que :

1. Les enjeux sont particulièrement importants sur le talus distal du volcan, et la vulnérabilité, dans les espaces ruraux comme dans les espaces urbains de la région du Merapi, a été identifiée et expliquée par beaucoup d'auteurs. Le chapitre complète ces observations par un éclairage original sur la perception du risque lié aux lahars qu'ont les habitants du Merapi. Les résultats montrent une connaissance convenable de l'aléa, avec toutefois d'importantes disparités spatiales. Les communautés du flanc ouest apparaissent mieux informées que celles vivant sur le sud du volcan ; de même, les habitants de l'amont connaissent mieux les lahars que ceux vivant plus en aval. Ces différences traduisent une préparation inégale aux dangers que peuvent représenter les lahars, notamment dans les espaces qui sont le plus à risque après l'éruption de 2010, et où les dégâts ont été parfois très importants.
2. Les dommages liés à la formation des corridors de lahars concernent d'abord le bâti : 860 maisons ont été endommagées dont 215 détruites. Une typologie des dégâts est proposée, insistant notamment sur les exemples des communes de Jumoyo et Sirahan. À la fin de la saison des pluies 2010-2011, plus de 3000 personnes avaient été directement affectées par les lahars, dont 724 sans-abris, et plus de 3400 personnes se rendaient momentanément dans des centres d'évacuation lorsque des lahars étaient annoncés. Les réseaux routiers ont été également très fortement perturbés sur le flanc ouest du volcan, avec un isolement progressif de certains villages dû à la disparition des ponts ; les conséquences des dommages sur le réseau s'observent sur plusieurs échelles spatiales et temporelles. Enfin, les ressources sont également menacées, notamment l'agriculture, qui souffre d'une réduction de la SAU de plusieurs dizaines hectares dans quelques communes, et d'une raréfaction de l'eau d'irrigation, compte tenu de l'enrichissement de la charge sédimentaire du fleuve Progo.
3. La gestion de l'aléa repose sur un partage officieux des tâches. Les gouvernements, les districts locaux et les ministères, financent l'entretien des rivières, la réparation des sabo-dams et la reconstruction de ponts adaptés. Le budget total atteint 44,5 millions € sans compter la réparation des maisons, qui semble encore mal engagée. Les travaux sont assurés par le Proyek Merapi, qui encadre l'ingénierie du volcan, en association avec des fournisseurs venus de Java-Est. La préparation à l'aléa (*preparedness*) est laissée aux scientifiques et aux ONG, mais ce sont les communautés locales elles-mêmes qui s'organisent pour surveiller les rivières, donner l'alerte en cas de lahar, et organiser des évacuations temporaires. Au final, si le bilan économique et social demeure élevé, le bilan humain est quasi-nul.

Pendant la saison des pluies qui a suivi l'éruption, les espaces du Merapi ont subi d'importants changements morphologiques et socioéconomiques, dont le point commun est la formation rapide des corridors de lahars dans lesquels s'accumulent les dépôts volcanoclastiques, que le chapitre suivant présentera plus en détail.

Chapitre 5 – Le matériel volcanoclastique au Merapi après les lahars de 2010-2011 : des dépôts de blocs et de sable dans les corridors de lahars

Les lahars survenus après l'éruption du Merapi à la fin de l'année 2010 ont produit d'importants changements géomorphologiques sur le talus distal du volcan, d'une part à cause de l'énergie mécanique des flux, mais également voire surtout à cause des dépôts qu'ils laissent derrière eux. Ces derniers recouvrent des champs, des maisons, des routes, et sont le témoignage des dégâts importants que sont susceptibles de provoquer les lahars (chap. 4). Après avoir étudié la manière dont s'ajustent et se forment les corridors de lahars et les impacts associés, la composition des dépôts qui les recouvrent mérite d'être détaillée, ne serait-ce que pour mieux comprendre quel type de matériel est transporté par les lahars, où il se dépose et sous quelles formes.

L'objectif de ce cinquième chapitre est de présenter les résultats de l'analyse sédimentologique des dépôts des lahars qui ont suivi l'éruption de 2010.

- (1) La géométrie des dépôts et les lithofaciès sont présentés, sur les différents talus du volcan (proximal, médial et distal). Les résultats s'appuient sur des analyses de coupe et des mesures granulométriques.
- (2) Les matrices sableuses, prélevées dans 15 sites sur l'ensemble du volcan, sont mesurées par granulométrie laser. Les résultats permettent d'analyser en détail la granulométrie de la composante matricielle des dépôts, et de tenter de distinguer des logiques de répartition spatiale.
- (3) Une carte de synthèse localise les différents types de dépôts et de matériel laissés par les lahars. Elle est à la base d'une réflexion sur la manière dont les populations locales s'accommodent de ces volumineux apports en sables et en blocs.

I. LES DÉPÔTS DE LAHARS DU MERAPI : PLANIMÉTRIE ET LITHOFACIÈS

Les dépôts volcanoclastiques se retrouvent le long des réseaux hydrographiques traversés par les lahars. Cette première rubrique vise à présenter les caractéristiques géométriques de ces dépôts autour du Merapi en étudiant les variations de leur forme sur le profil en long de la rivière. Dans un deuxième temps, les principaux lithofaciès des dépôts sont décrits et leur composition granulométrique mesurée à l'aide d'échantillons prélevés sur une large gamme granulométrique.

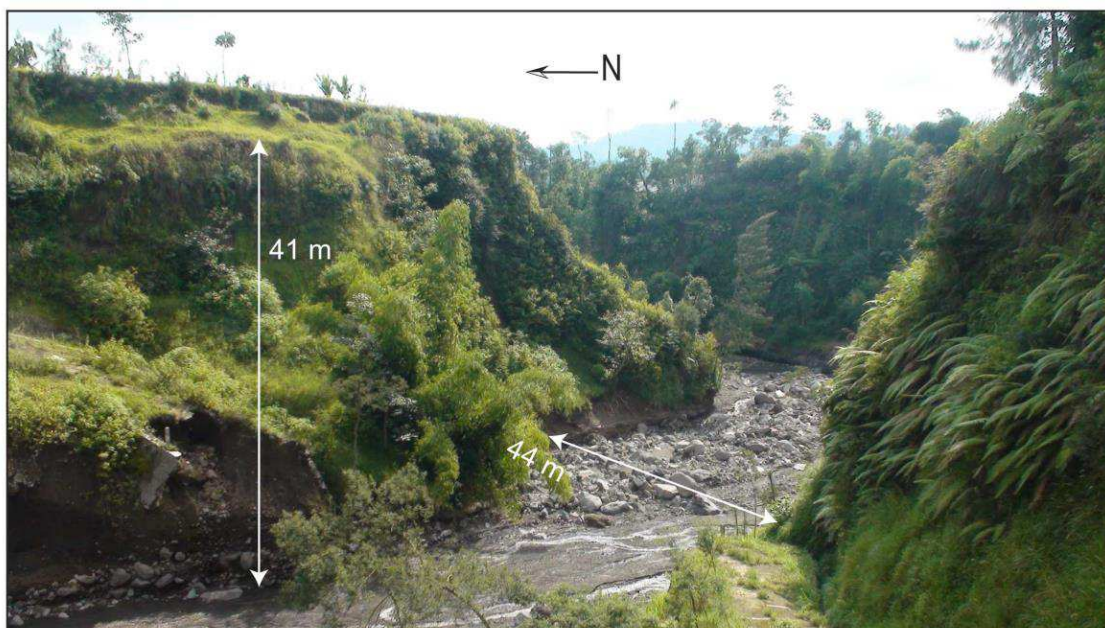
1. Planimétrie des dépôts

1.1 Le rôle du relief et des infrastructures

Dans la partie amont des rivières, sur le talus proximal du volcan, les dépôts de lahars recouvrent entièrement des fonds de vallées à la fois larges et profondes. Ces dimensions parfois imposantes (largeur maximale jusqu'à 150 m) contraignent les lahars entre des versants de plusieurs dizaines de mètres de haut qu'ils ne peuvent franchir (Figure 88). Dans les parties les plus proches du cône actif, vers 1200 m d'altitude, les fonds de vallées sont parsemés de blocs de très grandes dimensions (plurimétriques) déposés par des éboulements et coulées de débris granulaires, comme dans le fond de la Juweh (Figure 88), que les lahars peuvent remobiliser sur leur passage. Cette caractéristique de *bulking* est essentielle dans la dynamique des lahars, puisqu'elle participe à leur enrichissement sédimentaire (Vallance, 2000). Ils incorporent également du matériel arraché aux berges. L'érosion latérale provoque des éboulements ponctuels capables d'enrichir en matériel volcanique ancien et altéré (matériel épicyclastique) les dépôts de lahars. À la base du talus proximal se trouvent des dépôts à matrice sableuse ou gravelo-sableuse associés aux lahars, de forme subhorizontale légèrement bombée en son centre (Apu, Figure 88). Les dépôts sont incisés par les queues des écoulements qui les mettent en place puis par les lahars ultérieurs, surtout s'ils sont de type hyperconcentré. Les terrasses ainsi formées surplombent le talweg de quelques mètres.

En revanche, plus en aval, à mesure que se réduisent la pente et la hauteur des versants (4 à 7% sur le talus médial), les dépôts de lahars peuvent se retrouver sur les interfluves. Sur le talus médial du volcan, deux cas de figures peuvent être distingués (Figure 89): une tendance à la sédimentation, avec accumulation des dépôts à des altitudes avoisinant les 600 m (Boyong, Bebung, notamment). Il s'agit de zones où la topographie du fond de vallée a été adoucie par la présence permanente de sabo dams qui sont conçus pour briser l'énergie des lahars en les ralentissant et en bloquant leur transport sédimentaire. L'accumulation des dépôts tout au long des années 1970-1980 (Bebung) et dans la seconde partie des années 1990 (Boyong, Lavigne et Thouret, 2002) a permis de réduire la pente et de favoriser la dynamique de déposition. Celle-ci, du reste, est accentuée par la très faible énergie de la rivière. Sur son talus médial, la Boyong ne représente qu'un voire deux minces filets d'eau n'excédant pas 6 m de largeur, avec un débit insuffisant pour remobiliser le matériel apporté par les lahars, à part lors des crues en saison des pluies. Dans la Putih, en revanche, le talus médial est parcouru par une rivière plus énergique, à la fois plus rapide, plus large et plus profonde. Celle-ci est capable d'évacuer les particules fines des dépôts de lahars en ne laissant que des bancs de blocs et de cailloux constitués par les fractions grossières des levées naturelles du dépôt (Figure 89).

Sur le talus distal du volcan (pente < 4°), les rivières circulent dans des chenaux faiblement incisés (2 à 4 m) où une augmentation de débit peut se manifester par un débordement du flux hors du lit mineur. La tendance à l'étalement et à la formation de corridors élargis est de fait quasi-systématique. Ce cas de figure est bien représenté à Jambon, avec un large étalement latéral de dépôts sableux avec très peu de blocs (Figure 90). La présence d'une digue en béton a limité les débordements vers l'est et a favorisé par réverbération l'étalement du lahar sur la rive occidentale de la Gendol dont l'encaissement ne dépasse pas les 3 m. La situation est un peu différente pour la Pabelang, qui est plus large, et plus encaissée dans un corridor de lahar qui a subsisté sur sa partie distale (cf. chap. 3). Les terrasses de la rive gauche ont été recouvertes par au moins 1,5 à 2 m de dépôts, s'étalant parfois jusqu'à 150 voire 200 m vers le sud. Mis à part une partie de Tamanagung (cf. chap. 3 et 4), ces terrasses n'étaient pas occupées.



La Juweh à Jrahah, 1360 m - versant nord du Merapi

Le fond de vallée est recouvert de blocs volcanoclastiques et épiclastiques. La taille du bassin-versant suppose un apport mélangé entre des coulées de débris en provenance du Merapi mais aussi du Merbabu.



La Apu à Tlogolele, 1090 m - versant nord-ouest du Merapi

Le fond de vallée est entièrement recouvert de dépôts de lahars. Repérer la cicatrice d'éboulement sur le versant septentrional au second plan, ainsi que la présence de terrasses surélevées de 2 à 4 m formées dans les dépôts.

Figure 88 - Les dépôts sur le talus proximal du volcan (clichés E. de Bélizal, avril 2011)



La Boyong à Kemiri, 628 m - versant sud du Merapi

Les lahars s'écoulent dans un large corridor encadré de versants > 10 m, ce qui les empêche de menacer directement les villages situés sur l'interfluve. Les dépôts couvrent tout le fond de vallée, et restent en place compte tenu de la très faible énergie de la rivière (premier plan). Présence de blocs. Repérer sur la gauche de l'image la présence d'un banc de béton destiné à consolider la berge.



La Putih à Srumbung, 520 m - versant ouest du Merapi

La rivière est encadrée par une digue de béton sur le versant méridional (droite de l'image) mais rien ne protège le versant septentrional, mis à part des levées bâties pour limiter des débordements qui ont déjà endommagé les champs situés à moins de 4 m au-dessus de la rivière. Peu de dépôts mis à part une levée naturelle de blocs au centre du chenal : les matériaux fins sont rapidement évacués par le débit énergétique de la Putih.

Figure 89 – Les dépôts sur le talus médial du volcan (clichés E. de Bélizal, mars 2011). Repérer la présence de blocs pluri-décimétriques à métriques (Kemiri), décimétriques (Srumbung) ainsi que la forme irrégulière des lits mineurs qui parcourent et incisent les corridors de lahars.



La Gendol à Jambon, 232 m - versant sud du Merapi

La rivière coulant à fleur de sol, les débordements en cas de lahars sont systématiques. D'ailleurs, les reliques d'une digue en béton (voir à droite de l'image, second plan) témoignent de la récurrence de cette dynamique dans le passé. Les dépôts s'étalent largement hors du lit mineur sur un corridor de près de 185 m de largeur.

Pas de blocs visibles, le matériel semble constitué ici uniquement de sables, accumulés sur près de 1,5 m d'épaisseur. Des terrasses se forment, et sont rapidement érodées (voir chap. 3).



La Pabelan à Tamanagung 307 m - versant ouest du Merapi

Les dépôts de lahar s'accumulent sur plus de 200 m sur la rive gauche de la rivière (arrière plan). Le débit puissant de la rivière permet une évacuation rapide des fines, mais laisse des bancs de cailloux et de blocs au milieu du chenal. Les dépôts sont composés de sables, mais du matériel grossier est également visible en grande quantité, à la différence de l'exemple précédent (Jambon, Gendol). L'occurrence de coulées de débris de grande ampleur est à craindre sur cette partie du volcan, ainsi que le prouve l'examen des lithofaciès (cf. *infra*).

Figure 90 – Les dépôts sur le talus distal du Merapi
(clichés E. de Bélizal, mai 2011 à Jambon, avril 2011 à Tamanagung)

Tableau 27 - Aspects géométriques des dépôts de lahars du Merapi (d'après image GeoEye juin 2011)

SECTIONS	Longueur <i>L</i> (m)	Largeur <i>w</i> minimale (m)	Largeur <i>W</i> maximale (m)	Epaisseur <i>T</i> moyenne (m)	Surface <i>S</i> (m ²)	Volume approximatif <i>V_m</i> (m ³)	Pente <i>P</i> (%)
Ladon	1133	16	24	0,8	30280	24224	25,4
Juwah 1	2012	15	74	0,8	65440	52352	9,1
Juwah 2	4309	14	68	1	201749	201749	5,7
Apu	5900	48	169	3,1	450370	1396147	73
Trising	6857	42	95	1,4	561713	786398,2	7,3
Senowo 1	2875	23	196	1,1	262220	288442	14,4
Senowo 2	4963	52	181	2,2	528698	1163135,6	4,8
Pabelan 1	6679	85	310	2,7	997446	2693104,2	4,0
Pabelan 2	9762	37	240	0,4	750705	300282	0,9
Lamat 1	1346	6	66	0,9	39452	35506,8	7,6
Lamat 2	1530	14	90	1,4	62822	87950,8	4,7
Lamat 3	2034	15	90	1,7	75633	128576,1	4,3
Lamat 4	907	10	31	0,5	14606	7303	4,7
Lamat 5	457	13	60	1,1	14656	16121,6	5,0
Lamat 6	825	10	24	0,3	13257	3977,1	2,1
Blongkeng 1	2250	34	167	0,8	145714	116571,2	3,2
Blongkeng 2	1853	13	93	1,2	102087	122504,4	6,3
Blongkeng 3	1972	12	71	0,5	62923	31461,5	4,1
Blongkeng 4	12470	6	45	0,4	281453	112581,2	2,9
Putih 1	2409	107	195	1,4	357781	500893,4	9,9
Putih 2	2452	44	328	2,6	363591	945336,6	6,7
Putih 3	6058	41	121	1,1	515241	566765,1	4,3
Putih 4	4050	77	417	2,1	687477	1443701,7	1,9
Putih 5	1876	51	523	3,5	413968	1448888	1,3
Putih 6	1464	35	77	0,3	76000	22800	5,1
Batang	2622	31	87	0,4	169641	67856,4	6,7
Bebeng 1	3848	55	286	0,7	691742	484219,4	8,0
Bebeng 2	3824	51	193	1,4	384668	538535,2	5,1
Bebeng 3	1004	84	186	1,6	114025	182440	4,9
Krasak 1	6866	51	106	1,1	423178	465495,8	8,6
Krasak 2	12273	21	95	0,7	651643	456150,1	2,8
Boyong 1	2275	47	193	1,1	238395	262234,5	14,4
Boyong 2	2693	54	157	1,9	269820	512658	6,1
Boyong 3	17003	60	130	0,6	1407809	844685,4	2,6
Code	8494	31	87	0,3	846508	253952,4	1,3
Kuning 1	2454	72	173	0,8	259042	207233,6	9,3
Kuning 2	5397	32	234	1,7	621122	1055907,4	3,7
Kuning 3	10889	44	118	0,4	810812	324324,8	3,2
Opak 1	4934	60	103	3	364070	1092210	11,5
Opak 2	14895	56	150	1,3	1187326	1543523,8	3,1
Gendol 1	7097	43	145	1,2	675549	810658,8	8,5
Gendol 2	8335	76	454	2,3	1216167	2797184,1	4,1
Woro 1	5586	71	229	0,7	668472	467930,4	10,1
Woro 2	5509	53	109	1,2	473986	568783,2	2,8
Woro 3	4912	25	183	1	514707	514707	2,5
Total						25947462,8	

$V_m = S \times T$ et $P = \frac{H}{L} \times 100$ avec *H* : différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas de la section.

L'examen planimétrique des dépôts de lahars au Merapi montre dans certaines rivières une succession de sections irrégulières alternant des surfaces d'étalement avec des parties plus resserrées (Figure 91). Cette forme particulière est due à la permanence de sabo-dams. Le long des rivières où les lahars sont plus rares, le blocage opéré par des barrages moins vite comblés est plus visible et produit cette succession de « poches à sédiment ». L'aspect des dépôts apparaît ainsi fragmenté, et permet de distinguer plusieurs sections, jusqu'à 4 pour la Blongkeng et 6 pour la Lamat (Figure 91 et Figure 92). En revanche, dans les rivières où les lahars sont fréquents (Apu, Senowo, Putih, Boyong), les sabo-dams sont vite entièrement ensevelis (cf. chap. 4) et leur impact morphologique est rapidement estompé, donnant une forme plus nettement longiligne pour les dépôts depuis l'amont vers l'aval, rendant difficile la division en plusieurs sections (Figure 92). D'après les estimations du Tableau 27, le volume total de dépôts de lahars en juin 2011 est d'environ 0,026 km³ (26 millions de m³).

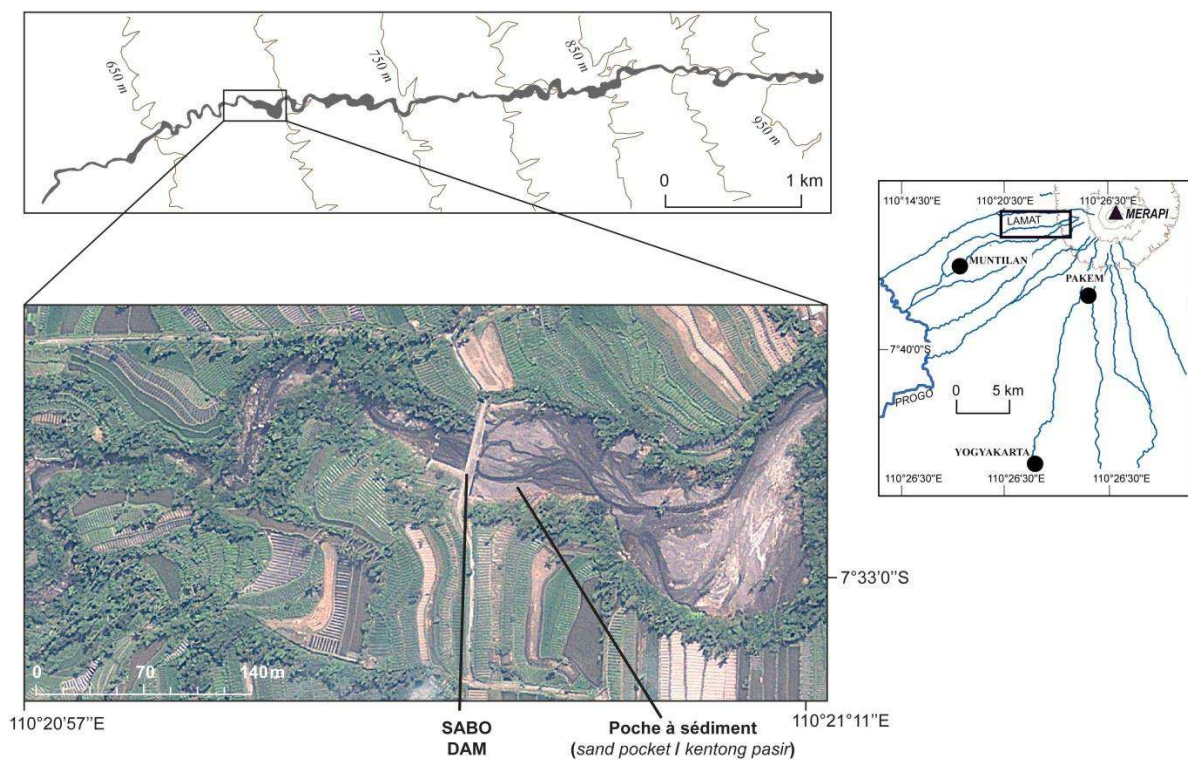


Figure 91 - Exemple de dépôts affectés par les infrastructures : les sabo-dams sur la Lamat
(image GeoEye, juin 2011)

Au final, la somme des estimations des volumes par section montre que les sous bassins-versants Pabelan, Putih et Opak-Gendol représentent près de 20 millions de m³ de dépôts à eux seuls soit plus des trois-quarts du volume total des dépôts de lahars lors de la saison des pluies 2010-2011 (Figure 92). Les valeurs sont particulièrement élevées dans la partie aval de la Gendol et de la Pabelan, qui représentent de fait des zones où la vigilance doit être constante.

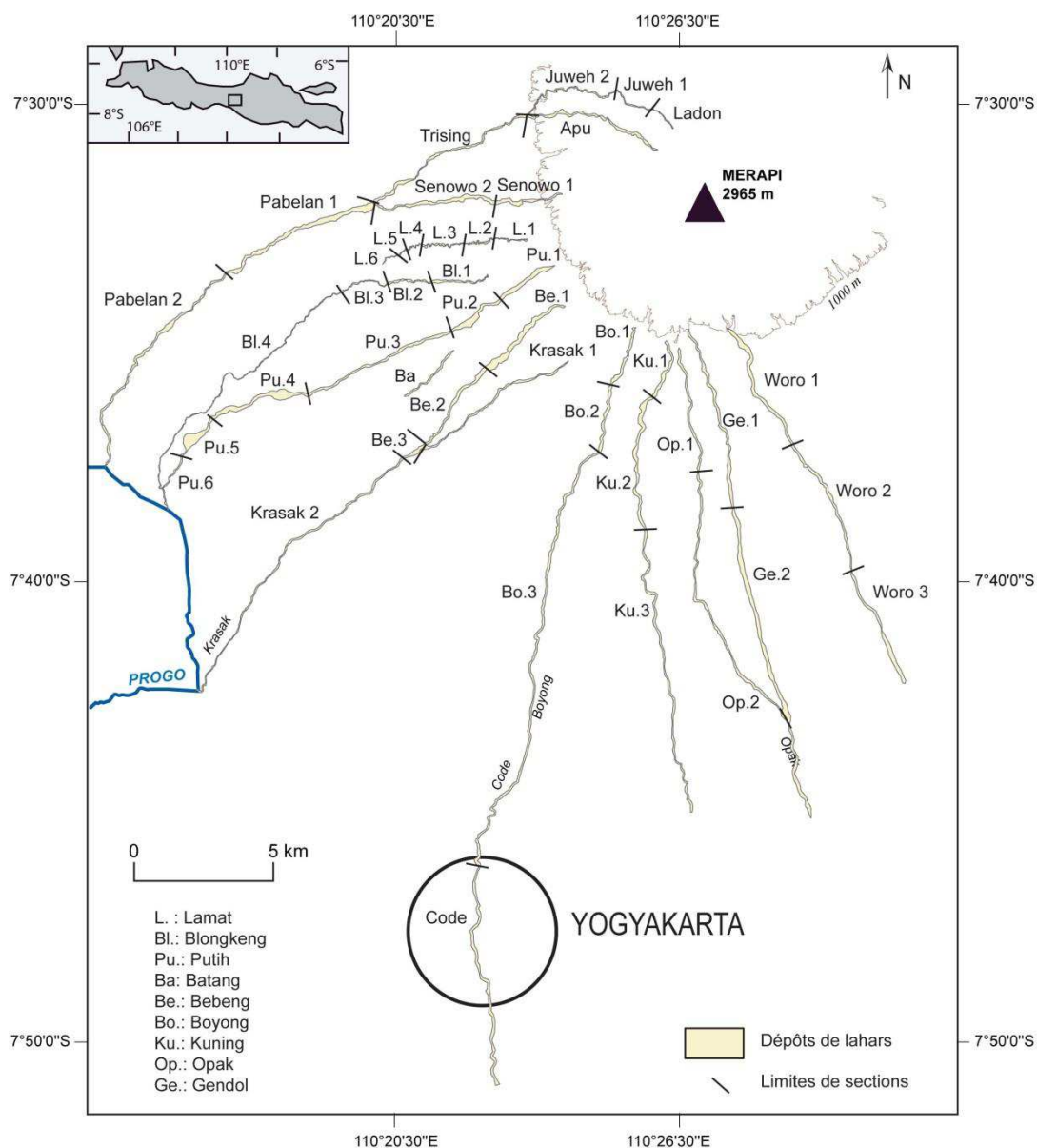


Figure 92 - Sections de calculs de géométrie des dépôts de lahars

1.2 Forme des corridors de lahars

La variabilité de la forme des corridors de l'amont vers l'aval est étudiée à l'aide de profils topographiques réalisés dans deux rivières du versant sud, la Boyong et la Opak (Figure 93).

Suite à l'éruption de 1994 qui a notamment dévasté le village Turgo (Abdurachman *et al.*, 2000), la Boyong et dans une moindre mesure sa partie aval, la Code, sont devenues le principal corridor d'écoulement des lahars jusqu'en 2003. Pour en limiter les impacts, les rivières ont été aménagées avec des sabo-dams sur la partie amont, puis le chenal a été creusé puis endigué sur sa partie aval jusque sur la Code. La Boyong coule ainsi très rarement entre des berges de moins de 2 m de hauteur, ce qui permet de limiter fortement les débordements. Les dépôts le long de la Boyong demeurent ainsi bien canalisés.

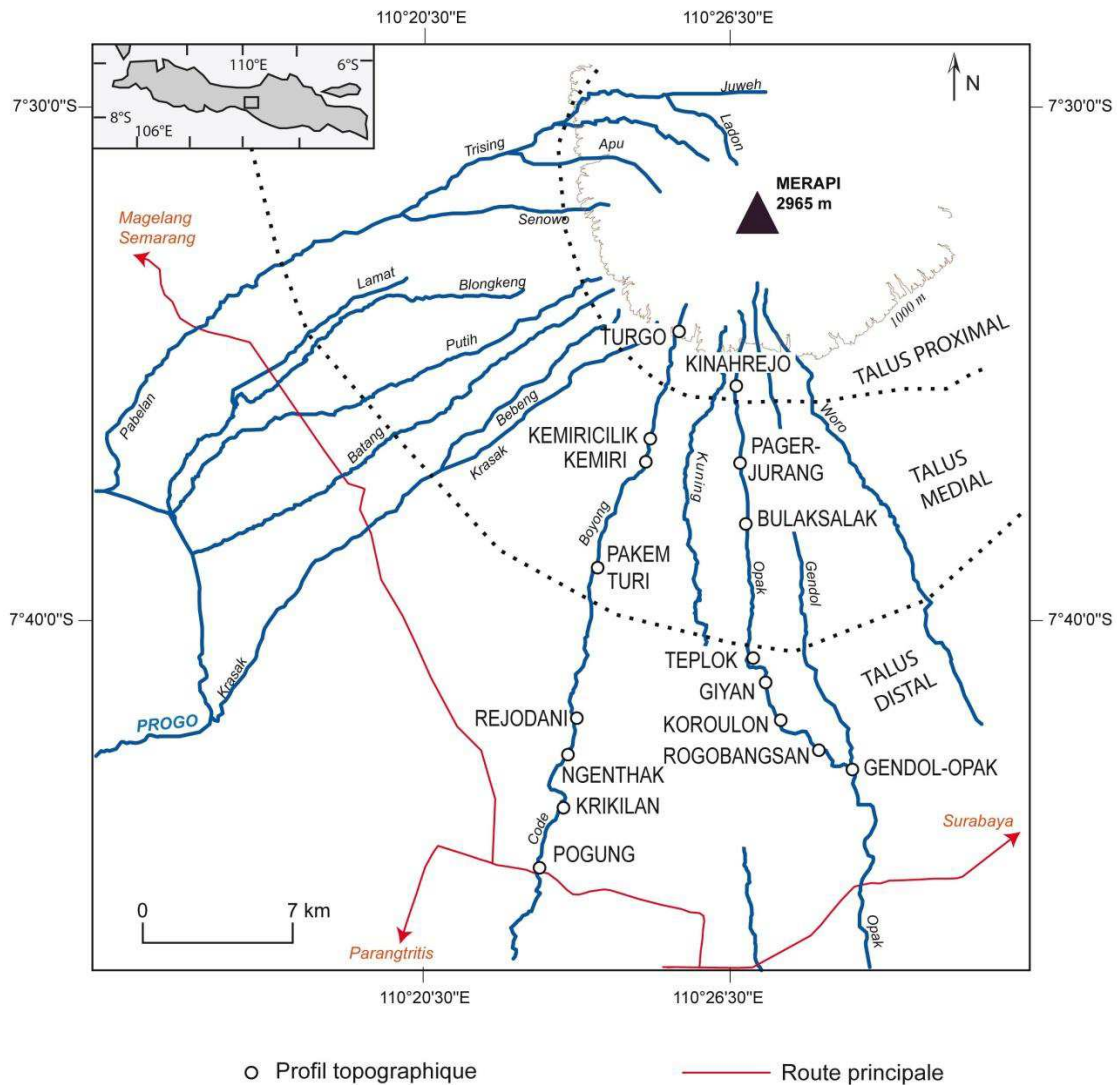


Figure 93 - Localisation des profils topographiques réalisés sur la Boyong et la Opak

Les effets de l'aménagement de la Boyong, et notamment la canalisation du cours d'eau, se manifestent nettement par l'augmentation de la largeur de la section mouillée à partir du pont de Pakem-Turi, sur le talus distal. La morphologie de la rivière prend la forme d'un trapèze régulier fixé par des berges bétonnées, dont le tiers est occupé par le lit mineur de la rivière (largeur comprise entre 14 et 20 m) qui circule en un chenal unique (Figure 94), au contraire de la Opak (Figure 95). Quelques terrasses encombrées de dépôts volcanoclastiques de diamètres essentiellement compris entre 2 et 64 mm parsèment irrégulièrement le corridor (Figure 96). La totalité des blocs de grande dimension (> 64 mm) est déposée en amont, retenue par les sabo-dams – désormais comblés – de Turgo et de Kemiri. L'épaisseur des dépôts diminue assez rapidement sur le talus médial, sous forme de terrasses de plus en plus minces, jusqu'à leur disparition au niveau de Pogung. Ils sont quasiment absents de l'agglomération de la Code, où ils ne subsistent que sous la forme de bancs de sables et de cailloux.

L'exemple de la Boyong montre que les aménagements ont pu aider à la canalisation des lahars dans un corridor entretenu. Toutefois, les chenaux risquent d'être comblés assez rapidement par les dépôts : le matériel grossier s'accumule, et plus de 60% de la largeur des chenaux sont désormais ensablés, jusqu'à Krikilan.



Figure 94 - Le chenal aménagé de la Boyong à Rejodani (cliché E. de Bélizal, avril 2011)

Épargnée par les lahars depuis 1971, la Opak n'a pas connu la même dynamique d'aménagements que la Boyong. Le réajustement morphologique de la rivière a été marqué par un élargissement rapide du chenal en réponse aux lahars répétés (Figure 95), à Panggung et Teplik notamment (chap. 4). Sur la partie proximale, à Kinahrejo, les lahars ont incisé les dépôts pyroclastiques (sur environ 4 m, chiffre comparable à celui avancé au chap. 3 pour Kaliadem), et ont laissé des terrasses recouvertes de dépôts volcanoclastiques. Les dépôts sont toujours épais à Pagerjurang mais s'amenuisent ensuite assez rapidement pour ne former qu'une maigre terrasse à Bulaksalak. En revanche, sur le talus distal, à la différence de la Boyong, ils sont étalés sur plus de 60 m sur l'interfluve, et traduisent la tendance à l'étalement du corridor (Figure 97). Ces débordements se retrouvent très fréquemment jusqu'à Giyan, sur toute une portion instable de la Opak qui subit de profondes transformations (Figure 95). À partir de Koroulon, des travaux d'entretien ont commencé le long du talus distal pour lutter contre l'érosion accélérée des berges. Les évidences de débordements se retrouvent cependant au niveau du confluent entre la Gendol et la Opak, notamment provoqués par la rencontre de deux lahars distincts.



Figure 95 - Le corridor de lahars de la Opak à Teplik (cliché E. de Bélizal, mai 2011)

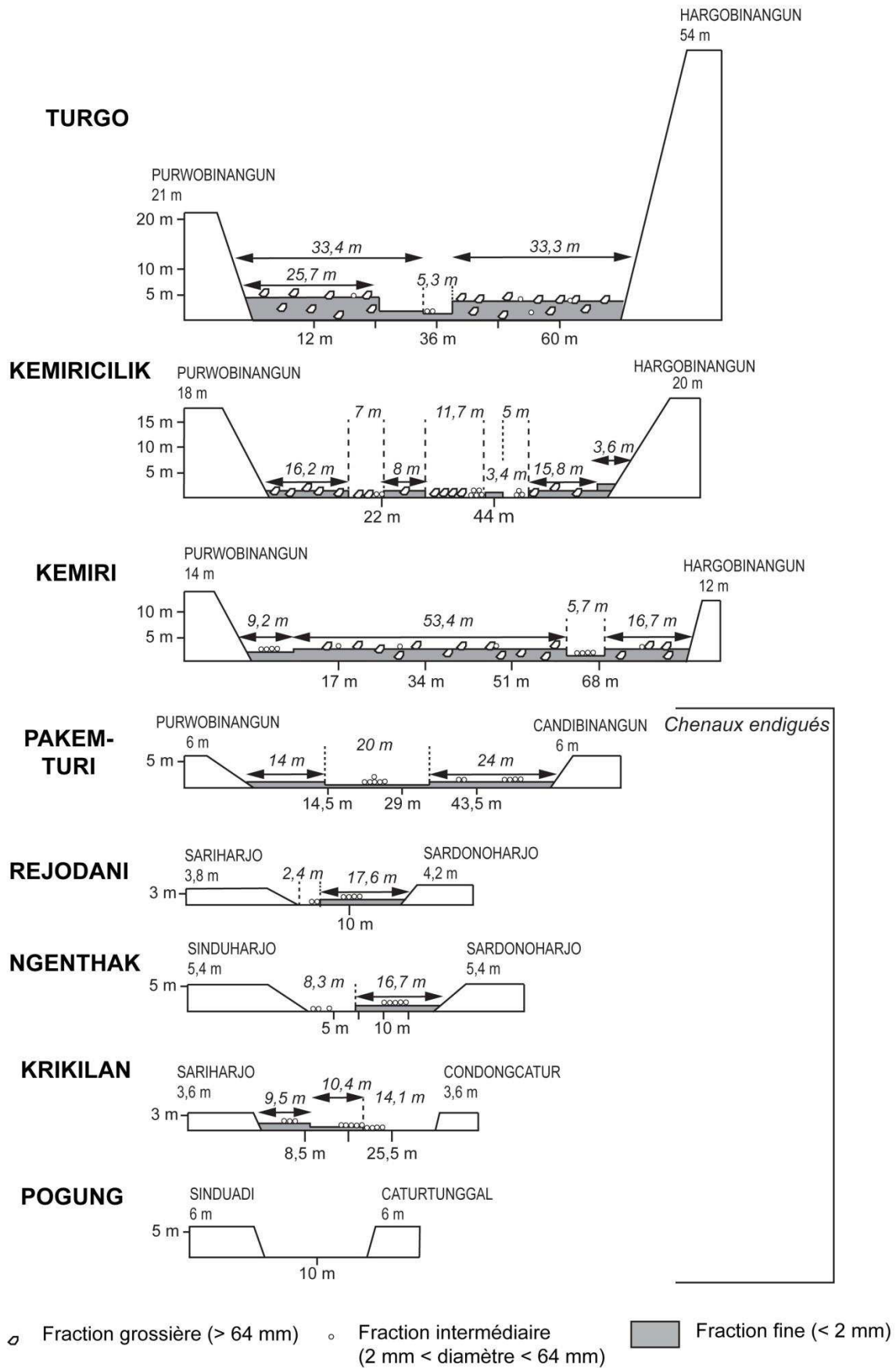


Figure 96 – Le corridor de lahars dans la Boyong en mai 2011 (lit mineur entre lignes pointillées)

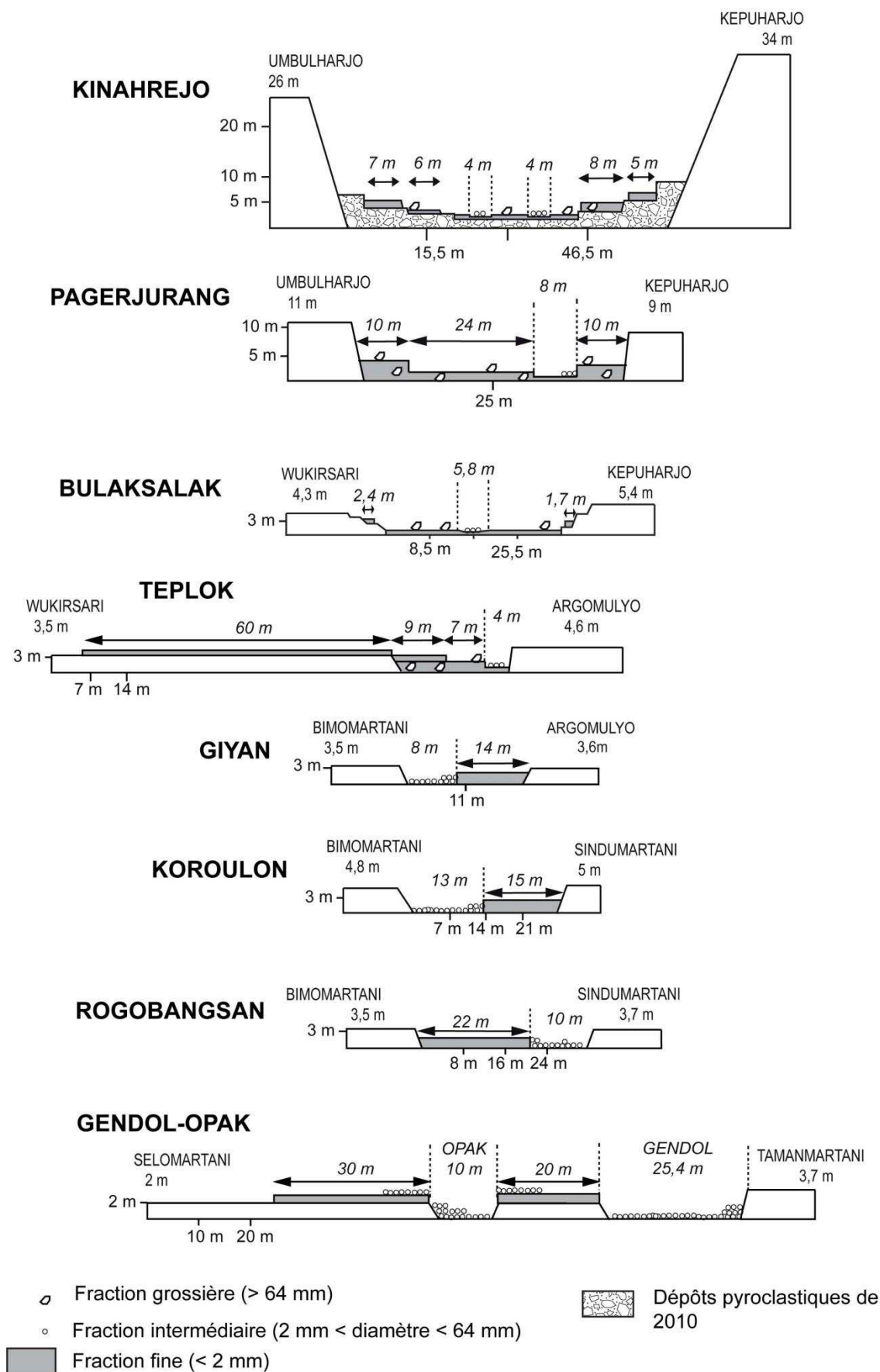


Figure 97 Le corridor de lahars dans la Opak en mai 2011 (lit mineur entre lignes pointillées)

2. Lithofaciès des dépôts de lahars de l'amont vers l'aval : la permanence d'une importante proportion des fractions grossières

La présentation des lithofaciès (Figure 98) repose sur des coupes analysées sur le terrain, étayées par des analyses sédimentologiques réalisées à partir d'échantillons comprenant à la fois des fractions fines ($< 2 \text{ mm}$ soit $> 1 \phi$) et des éléments grossiers (diamètre D compris entre 2 et 64 mm soit $-6 \phi < D < +1 \phi$, voir annexe C.1). L'analyse des plus grands clastes a été effectuée par des observations *in situ* et par l'examen photographique d'une fenêtre de $1 \times 100 \text{ cm}$ ou $80 \times 80 \text{ cm}$ en fonction de la dimension des couches, afin d'apporter un élément d'information supplémentaire sur les matériaux de grandes dimensions qui constituent les dépôts volcanoclastiques.

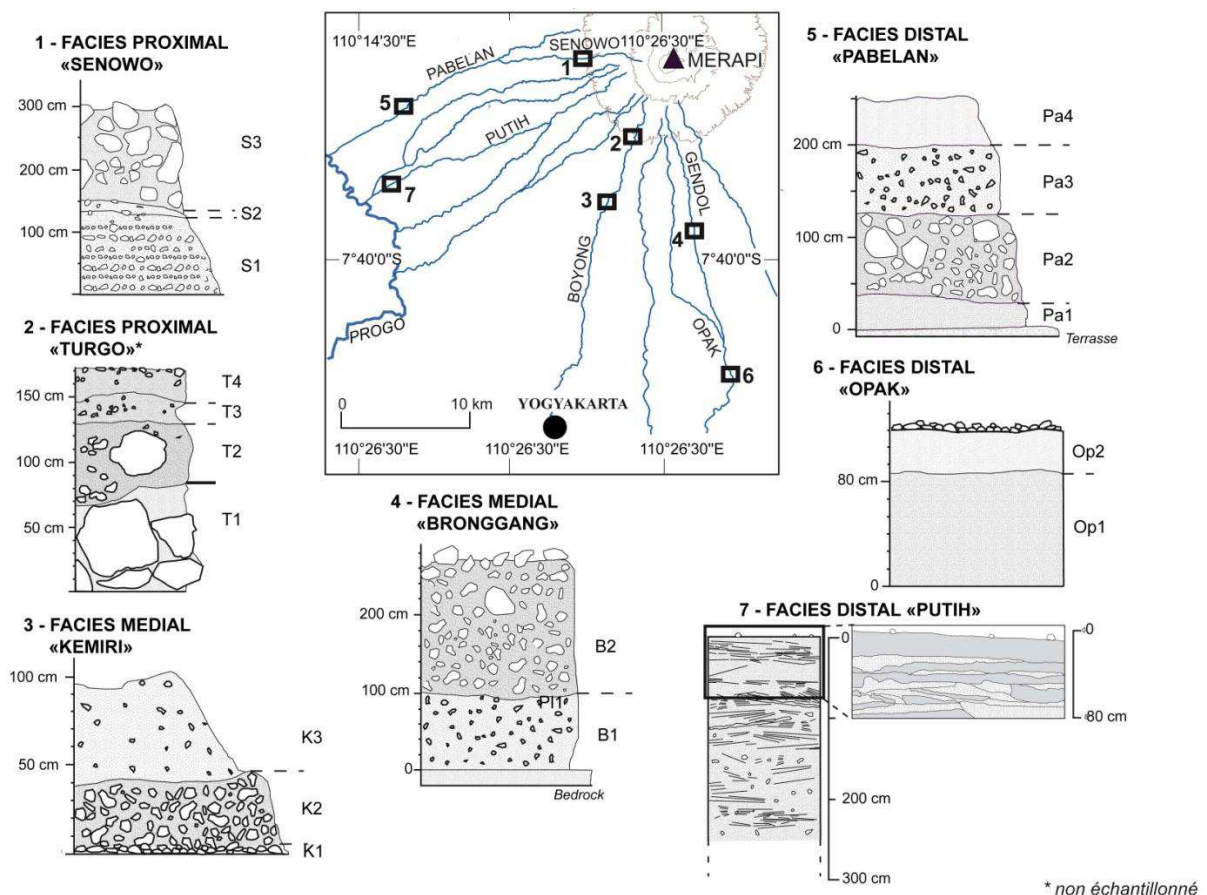


Figure 98 - Lithofaciès des dépôts de lahars du Merapi survenus pendant la saison des pluies 2010-2011

2.1 Les dépôts de lahars du talus proximal

L'analyse sédimentologique repose sur des échantillons récupérés dans l'amont de la Senowo, sur un dépôt massif de 3 m de haut, de date inconnue mais postérieure à l'éruption de 2010. L'organisation du dépôt montre trois unités nommées S1, S2 et S3 (Figure 98 et Figure 99). La première couche S1 a une épaisseur de 67 à 110 cm, et montre à première vue un ensemble hétérométrique de matériel plutôt mal trié, et sans granoclassement. La seconde couche S2 est beaucoup plus mince (21 à 40 cm), et composée d'un matériel plus fin, en apparence mieux trié, mais sans granoclassement. Enfin, la couche S3 est particulièrement massive, de par son épaisseur (160 cm) mais aussi par la présence de gros blocs pluri-décimétriques. La fabrique des blocs rend peu évidente l'organisation interne de cette unité, même si une tendance à un léger granoclassement inverse est

visible. On retrouve cette tendance au granoclasement inverse sur la couche T4 des dépôts proximaux de la Boyong à Turgo (Figure 98).

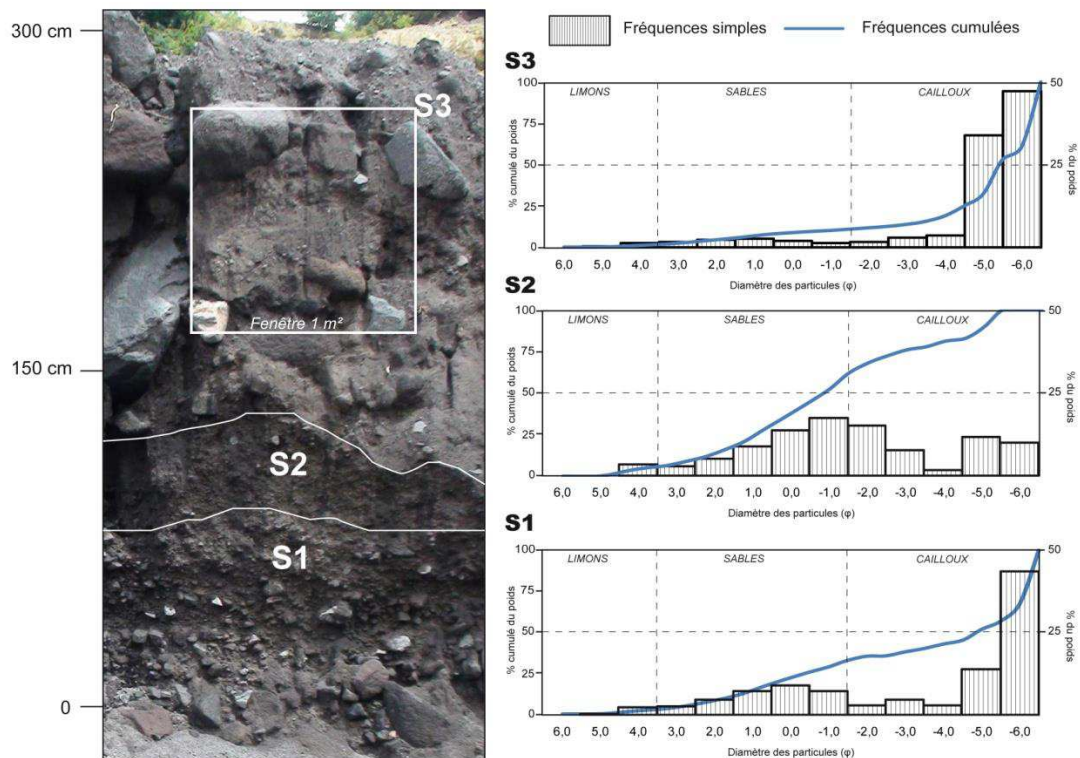


Figure 99 – Exemple de lithofaciès à support clastique du talus proximal (cliché E. de Bélizal, avril 2011)

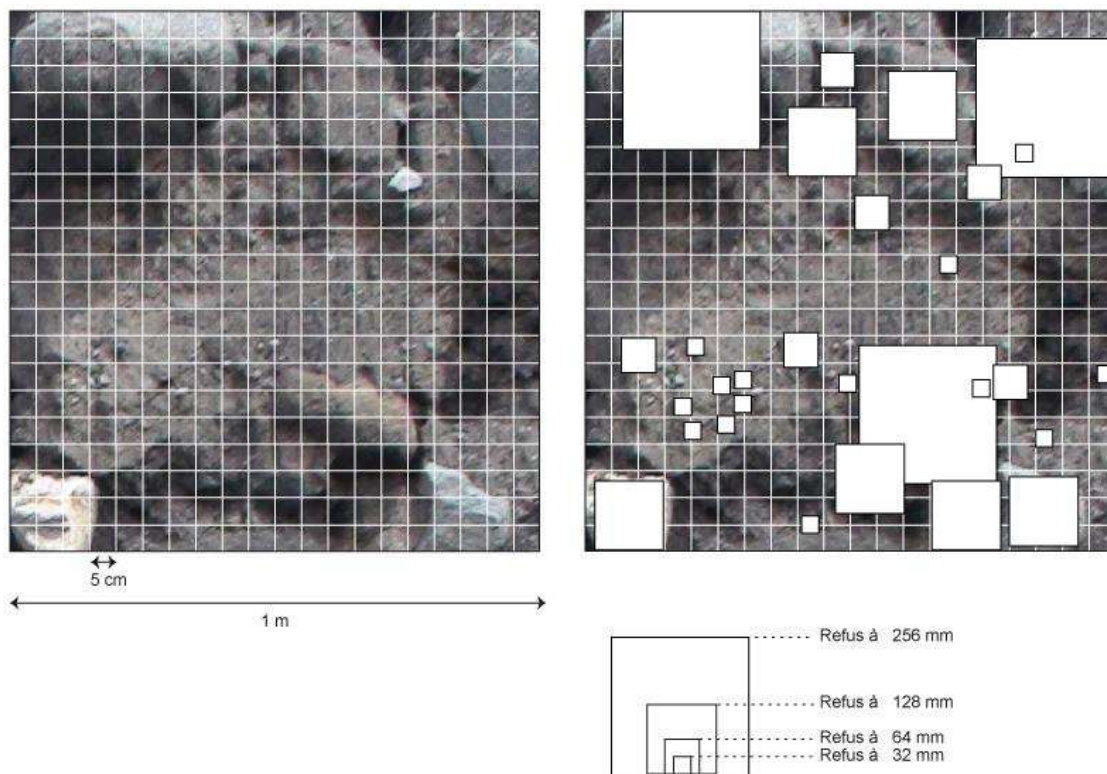


Figure 100 - Fenêtre de 1 m² utilisée pour l'étude de la fraction grossière de la couche S3 (cliché E. de Bélizal, avril 2011)

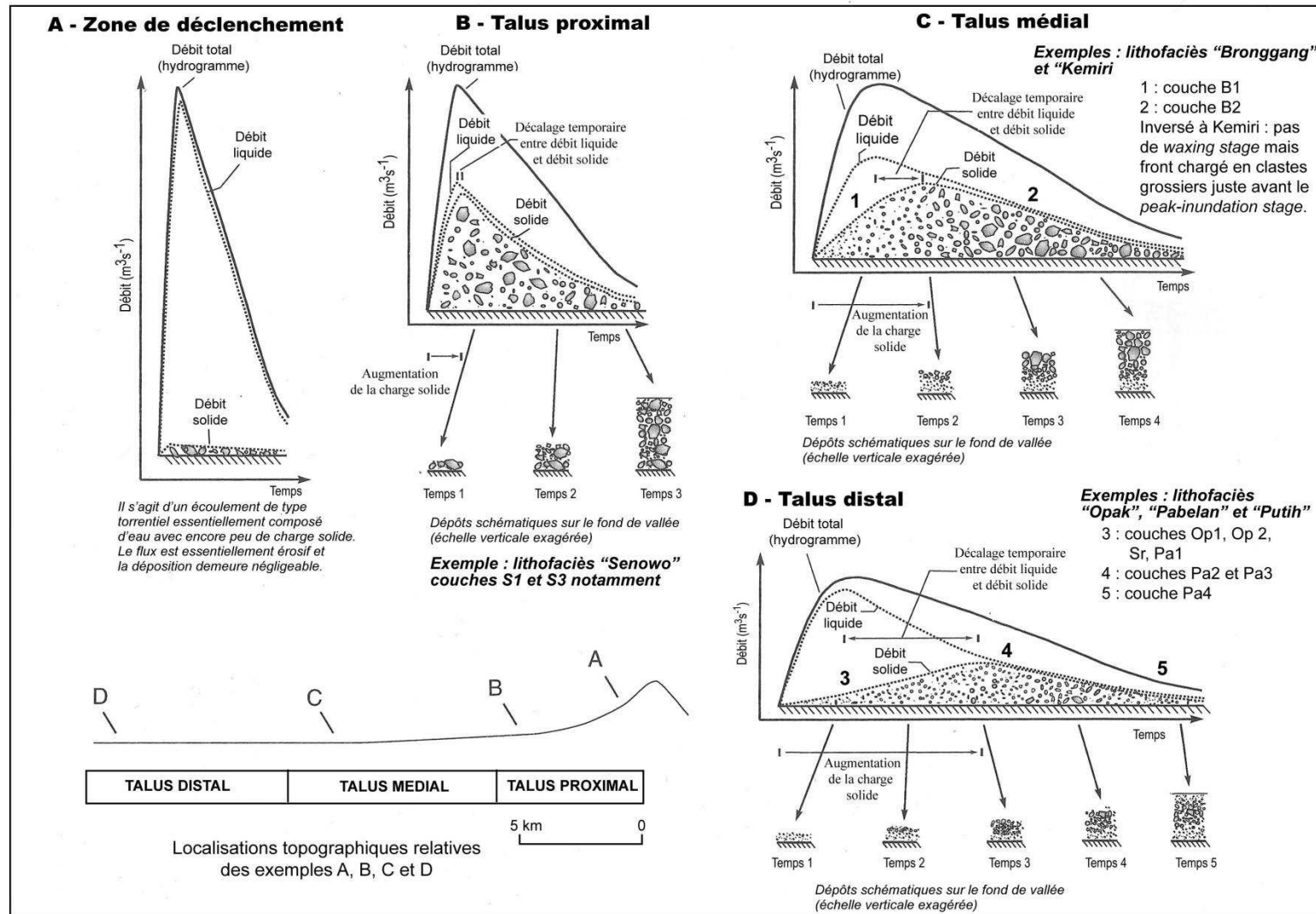


Figure 101 - Dynamiques de déposition des lahars (adapté de Vallance, 2000)

Les textures de ce lithofaciès proximal sont très grossières. La couche S1 est composée à 43 % de clastes de diamètre > 64 mm ($< -6 \phi$), dans une matrice gravelo-sableuse où les graviers et les sables grossiers (diamètre entre 0,5 et 20 mm soit 1 à -2ϕ) sont particulièrement abondants (26 % du poids total). Les fractions fines sont essentiellement composées de sables fins et moyens (diamètre entre 0,05 et 0,5 mm, soit 1 à 4ϕ), mais la fraction argilo-limoneuse ($< 0,05$ mm, soit $> 4 \phi$) est très faible, à 0,15% du poids total. La couche S3 montre également des textures très grossières ($< -6 \phi$), où la part des clastes compte pour 47% du poids total de l'échantillon. Les blocs métriques n'ont pas été échantillonnés, mais la Figure 100 montre qu'ils occupent jusqu'à 80% de la surface photographiée (1 m²). Cela se traduit notamment par la présence de trois clastes anguleux de diamètre ≥ 256 mm ($< -8 \phi$), et six de diamètre D compris entre $128 \text{ mm} < D < 256 \text{ mm}$ (entre -7 et -8ϕ). Les dimensions maximales visibles du claste le plus grand de la surface photographiée de S3 sont 250×400 mm. La couche S2 en revanche montre un dépôt comparativement plus fin dépourvu de classes > 64 mm, tandis que les graviers et les sables grossiers comptent pour 52% du poids total de l'échantillon.

Les lithofaciès proximaux sont ainsi caractérisés par des formations hétérométriques au tri inexistant. Ils correspondent à des écoulements très riches en clastes de grandes dimensions, qui représentent une part considérable du poids total des échantillons. La faible teneur en matériel fin y compris dans les unités apparemment moins grossières accentue cet effet massif des dépôts en amont des corridors. Les dynamiques de déposition des lahars commencent à partir de la partie basse du talus proximal, lorsque le flux s'est suffisamment enrichi en matériel solide (Vallance, 2000). La Figure 101, adaptée ici à l'exemple du Merapi, montre qu'à l'amont des rivières, la déposition de matériel de grande dimension se fait très rapidement, notamment parce que la pointe du débit solide est quasi-synchrone de celle du débit liquide, dans des dynamiques de coulées de débris encore très peu diluées (Figure 101, type B : les masses respectives de l'eau et de la charge solide sont quasi égales).

2.2 Les dépôts de lahars sur le talus médial

Le long du talus médial, les lithofaciès présentent deux grands types de dépôts mis en place par des écoulements de natures différentes (Figure 98 et Figure 102). Les lahars qui atteignent le talus médial s'écoulent soit selon les propriétés rhéologiques des coulées de débris soit selon celles des écoulements hyperconcentrés (Scott *et al.*, 1995). La différence de concentration et de mode de transport, l'inégale dynamique interne du flux (angles de friction, notamment) entre ces deux types (cf. chap. 1) amènent une différenciation nette des dépôts qui en résultent.

Le lithofaciès « Kemiri » (Figure 102) présente un exemple de dépôt d'écoulement hyperconcentré, sur le talus médial de la Boyong. Le dépôt est lié à un lahar d'ampleur limitée (épaisseur < 1 m), avec une mince unité basale à structure ouverte type *open-work* (K1) couronnée par deux couches de dépôts à support matriciel d'épaisseur comparable (K2 et K3). Il est possible qu'à l'origine K1 et K2 ne formaient qu'une seule unité sédimentologique, mais le passage d'écoulements temporaires en cas de pluies a pu évacuer les fines de K1, lui donnant l'aspect d'un pavage alluvial, d'ailleurs fréquent à la base des dépôts de lahars (Vallance, 2000 ; Capra *et al.*, 2004). L'unité K2, qui contient 42% de clastes > 64 mm ($< -6 \phi$) et 19,3 % de graviers et sables grossiers, est liée au passage d'un front composé de matériel grossier, non classé, et d'épaisseur réduite (40 cm). Le dépôt met en évidence le passage ultérieur d'une seconde pulsation (couche K3) moins riche en fraction grossière, composée à 70% de sables et à 16% de graviers. Tout comme K2, K3 est peu épaisse (57 cm), mais montre un léger granoclassement inverse. Ce type de lithofaciès où alternent des couches à support clastiques grossiers et des couches à support matriciel plus épaisses est très répandu sur l'ensemble des rivières du talus médial du Merapi. Il s'agit d'écoulements hyperconcentrés, marqués dont le front contient du matériel grossier, qui n'atteint toutefois pas les dimensions des gros blocs transportés par les coulées de débris, et suivi par des pulsations transportant plus de fines. Les dépôts associés à ces

écoulements demeurent néanmoins de taille réduite, avec des épaisseurs dépassant très rarement les 2 m sur le talus médial.

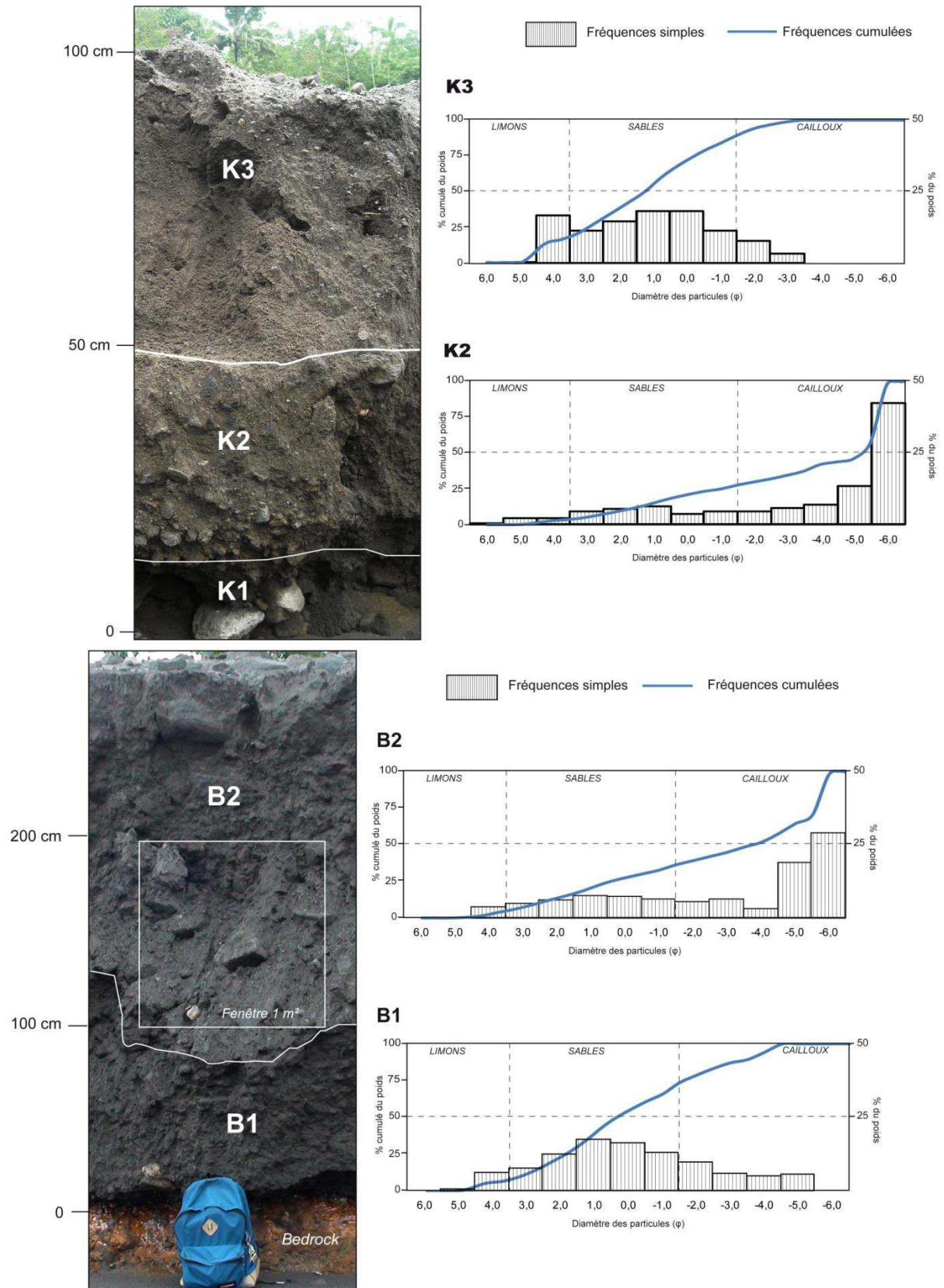


Figure 102 – Les lithofaciés du talus médial : présence de faciès à support clastique ou à support matriciel sur les couches Kemiri (K) et Bronggang (B) (clichés E. de Bélizal, mars 2011)

Le faciès « Bronggang » (Gendol) met en évidence un autre lithofaciès (Figure 102, Figure 103) dans lequel l'alternance entre dépôts à support clastique grossier et dépôts à support matriciel est inversée, et qui semble plutôt lié cette fois-ci à des dynamiques proches des coulées de débris symbolisées par Vallance (2000, voir Figure 101, type C). Dans cet exemple, on distingue deux unités correspondant à deux phases distinctes de l'écoulement, dans lesquelles aucun tri ni classement n'est visible. La première pulsation correspond au passage du front du lahar, et qui présente un dépôt (B1) à support matriciel comparable à l'unité K3 (Kemiri, Boyong), dépourvu de clastes inférieurs à -6ϕ . Les graviers et les sables grossiers représentent en revanche deux tiers du poids de l'échantillon, et les sables moyens et fins 30%. Cette unité de texture plus fine correspond à un écoulement hyperconcentré survenu lors de la première phase de l'écoulement, caractérisée par un décalage entre le débit liquide précédant le débit solide (Figure 101). La seconde pulsation du lahar en revanche, plus concentrée, a déposé des matériaux beaucoup plus grossiers (B2), où les clastes inférieurs à -6ϕ représentent 35 % du poids total de l'échantillon, les cailloux et les graviers 22 %, tandis que les sables sont en proportion plus faible (32 %). L'analyse photographique d'une fenêtre de 1 m² montre quatre clastes de diamètre D compris entre 128 et 256 mm (-7 à -8ϕ), dont les dimensions maximales du plus grand mesurent 150 × 212 mm. L'essentiel du matériel grossier est représenté par des clastes de taille comprise entre 32 et 64 mm (-5 à -6ϕ).

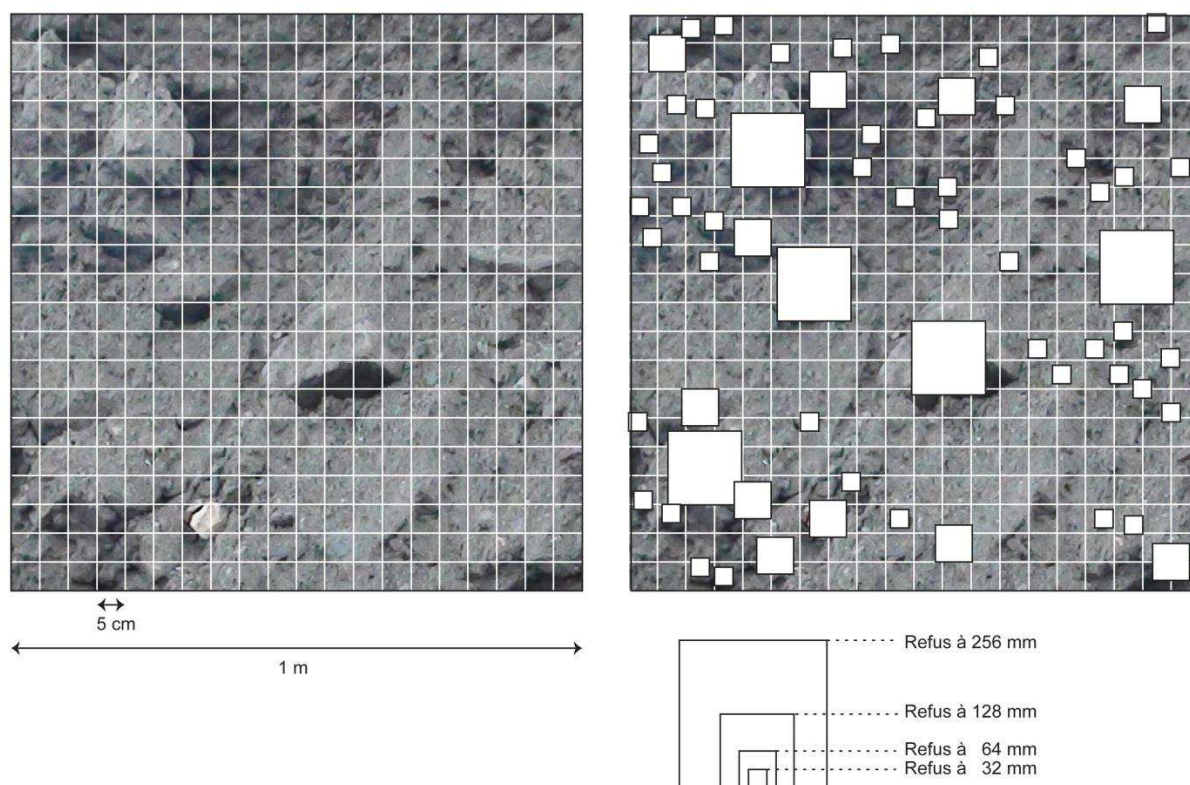


Figure 103 - Fenêtre de 1 m² utilisée pour l'étude de la fraction grossière de la couche Bronggang B2
(cliché E. de Bélizal, mars 2011)

Cette couche rejoint les faciès classiques des coulées de débris, caractérisés par une forte hétérométrie, des clastes de grande taille, un tri absent du matériel et une structure générale à granoclassement inverse qui donnent l'illusion que la masse de l'écoulement a été brusquement figée, à partir du moment où la force de cisaillement du flux n'en dépassait plus la limite d'élasticité (Pierson, 1995 ; Iverson, 1997). Ce genre de dépôt sur les parties médiales survient lorsque la dilution du lahar commence sur le front et se répand vers la queue de l'écoulement au fur et à mesure qu'il se déplace vers l'aval (Vallance, 2000), amenant un plus long décalage entre les pointes de débit liquide et solide : le front du lahar apparaît plus dilué et est suivi par un écoulement hyperconcentré (B1, Figure 101, type C, catégorie 1), tandis que le milieu de l'écoulement présentera encore des caractéristiques de coulées de débris (B2).

2.3 Les dépôts de lahars sur le talus distal

Sur le talus distal du volcan, les dépôts affichent deux grands types de lithofaciès liés au comportement rhéologique distal des lahars (Figure 98). Dans un premier cas (Figure 104), on assiste à une certaine dilution de l'écoulement vers l'aval qui produit des lithofaciès où prédominent de manière quasi uniforme les matériaux fins (sables et limons). Comme les écoulements de masse ne gagnent pas en intensité vers l'aval, puisque la diminution de la pente en limite l'énergie, il s'opère une transformation dynamique de la rhéologie du flux, lequel perd en intensité à mesure qu'il s'éloigne de sa zone de déclenchement (Pierson, 1985 ; Scott *et al.*, 1995 ; Lavigne *et al.*, 2000a ; Lavigne et Thouret, 2002). Dans l'autre cas (Figure 105), il s'agit au contraire de dépôts de coulées de débris qui n'ont pas subi cette transformation rhéologique vers des dynamiques d'écoulements torrentiels, et qui circulent loin sur le talus distal.

Le dépôt « Opak » montre deux couches sableuses (Op1 et Op2, Figure 104) d'épaisseur réduite où le tri apparaît meilleur que celui des lithofaciès proximaux et médiaux. Dans la couche Op1, le matériel grossier est quasiment absent, les graviers ne comptent que pour 1,4% du poids total de l'échantillon. Le lithofaciès sableux suggère une mise en place proche de dynamiques torrentielles moins turbulentes que celles des coulées de débris ; il s'agit d'un dépôt de lahar qui a déjà perdu l'essentiel de son énergie sur le talus distal du volcan. Toutefois, la partie sommitale Op2⁷, est formée de sables moyens et fins mais est aussi coiffée par des clastes qui rappellent que des lahars plus concentrés peuvent également se produire, même si l'on ne retrouve pas ici les lithofaciès massifs visibles plus en amont sur la Gendol (faciès « Bronggang »).

Le dépôt « Putih », trouvé à Sirahan (Figure 104), présente un faciès essentiellement sableux sur près de 3 m d'épaisseur, où les clastes supérieurs à 64 mm ($< -6 \phi$) sont absents. La structure des dépôts présente des lits entrecroisés dont la distribution granulométrique générale est constituée de graviers et petits cailloux (5%), de sables grossiers (33%) et de sables moyens et fins (42%) et de fraction limoneuse à 20%. Le mode de déposition en figures sédimentaires ondulées et en laminations entrecroisées évoque des structures fluviales de moindre énergie ; il est dû à l'action répétée d'écoulements plus riches en eau et faiblement chargés en clastes, même si quelques blocs de grandes dimensions peuvent être repérés, notamment à proximité de la rivière et du chenal temporaire qu'elle s'est creusée au cœur de la zone habitée (cf. chap. 3). Cependant, on trouve peu de matériel grossier sur cette partie de la Putih ; les clastes se déposent massivement un kilomètre en amont, au niveau de la commune de Jumoyo, où ils ont provoqués des dégâts de grande ampleur (cf. chap. 4). Les lithofaciès « Opak » et « Putih » sont mis en place par des écoulements dont le débit solide est très inférieur au débit liquide ; la charge solide est de petite dimension (Figure 101, type D, catégorie 3).

⁷ Granulométrie indisponible, l'échantillon ayant été perdu.

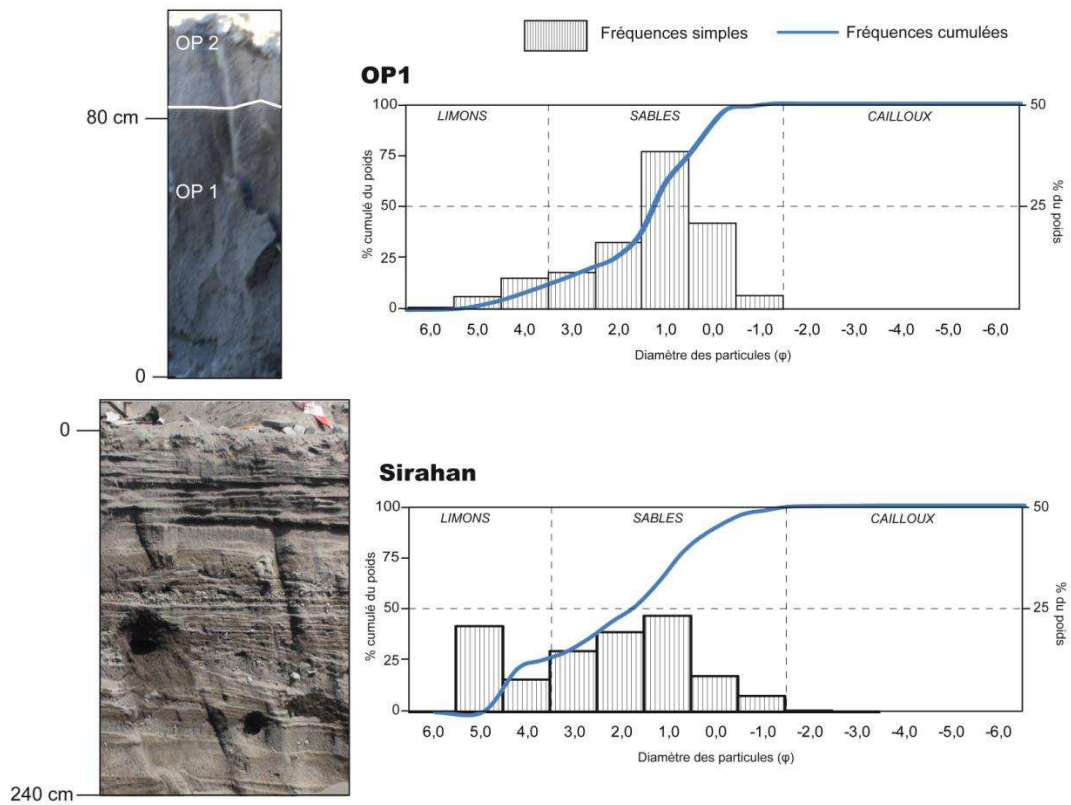


Figure 104 – Les lithofaciès à support matriciel du talus distal (cliché E. de Bélizal, mai 2011)

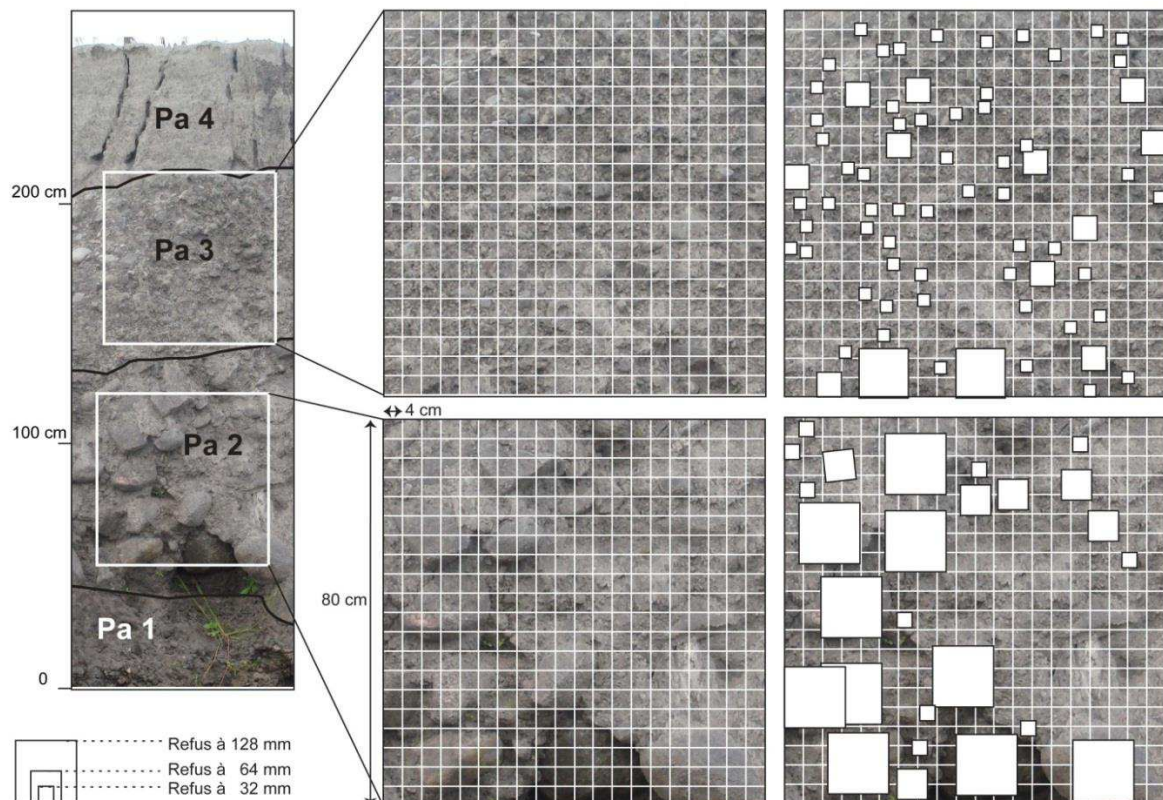


Figure 105 – Lithofaciès à support clastique sur le talus distal, exemple d'une coulée de débris de grande intensité, site Pabelan (cliché E. de Bélizal, avril 2011)

Le dernier type de lithofaciès distal est « Pabelan », et a été décrit à Tamanagung (Figure 105). Il est le seul exemple de dépôt d'une coulée de débris massive à plus de 15 km du sommet du Merapi, sur le talus distal du volcan. Ce dépôt correspond effectivement au plus gros lahar recensé pendant la saison des pluies 2010-2011, survenu le long de la Pabelan le 30 mars, et ayant endommagé le village de Tamanagung (cf. chap. 3 et 4). Des faciès de type coulée de débris peuvent être reconnus dans les couches Pa2 et Pa3, d'une épaisseur de 170 cm, avec des clastes pris dans une matrice sableuse voire graveleuse. Ces dépôts reposent sur une unité plus mince d'une quarantaine de cm mise en place pendant la phase d'écoulement comprise avant le corps du lahar qui apporte les fractions les plus grossières (Figure 101, type D, catégorie 4). La couche Pa2 mesure 85 cm d'épaisseur et est caractérisée par une très forte proportion de clastes de très grande taille. L'étude de la fraction grossière sur une fenêtre de 640 cm² montre dix clastes refusés à 128 mm (-7 ϕ), et un nombre assez réduit de matériel graveleux ; la dimension maximale des clastes est de 240 × 282 mm soit des blocs, montrant l'évidence d'une coulée de débris particulièrement puissante sur ce talus distal. La couche Pa3 mesure 80 cm, et est composée de clastes de dimensions plus petites. La photographie du dépôt montre peu de matériel refusé à 128 mm, mais une grande proportion de clastes de diamètre D compris entre 32 et 64 mm (-5 à -6 ϕ). Il s'agit du corps du lahar après le passage du front (Pa2), caractérisé par le transport d'un matériel plus petit que celui de Pa2. La plupart de la surface mesurée contient des éléments appartenant à la fraction des cailloux, en vrac dans une matrice essentiellement constituée de sables très grossiers et de graviers. Enfin, l'unité sommitale (Pa4) est de texture plus fine, et a été déposée au cours du passage de la queue du lahar (Figure 101, type D, catégorie 5). Cette couche présente peu voire pas de clastes de taille supérieure aux graviers, et correspond à une phase plus diluée du flux. Après le passage de la coulée de débris, le lahar s'est écoulé sous la forme d'un écoulement hyperconcentré, suffisamment puissant toutefois pour provoquer des débordements capables de recouvrir les dépôts des deux premières phases accumulés sur plus de 2 m, eux-mêmes recouvrant déjà une terrasse située à 5 m au-dessus du lit mineur. D'une épaisseur de 50 cm, elle porte à 250 cm l'épaisseur totale de ces dépôts correspondant à un seul événement sur le talus distal du volcan. La présence de faciès sédimentaires à supports clastiques grossiers plutôt visibles sur les talus proximal et médial du volcan est toutefois moins fréquente que ceux composés de matériel sableux. Ces derniers peuvent également être très épais (> 3 m à Sirahan), mais ne représentent pas le même danger compte tenu de leur faible teneur en clastes de grandes dimensions ; aussi, les dégâts associés ne sont-ils pas les mêmes (chap. 4) : la plupart des maisons de Sirahan ont été endommagées ; celles de Tamagung ont été toutes entièrement détruites.

3. Bilan

Les différents lithofaciès détaillés ci-dessus présentent des paramètres de structure et de texture communs sur l'ensemble du Merapi, rejoignant les architectures sédimentaires de coulées de débris et d'écoulements hyperconcentrés voire torrentiels déjà mis en évidence le long de la Boyong par Lavigne *et al.* (2000a) et Lavigne et Thouret (2002). En 2010-2011, comme la répartition spatiale des lahars est bien plus large qu'auparavant, les modes de répartition spatiale de ces dépôts peuvent être étudiés non plus sur une seule rivière, mais sur l'ensemble du volcan. Existe-t-il des logiques de répartition spatiale ?

La démarche de présentation des lithofaciès a suivi une procédure commode de différenciation des formes de dépôts depuis l'amont vers l'aval, en prenant des exemples précis sur chacune des grandes auréoles structurales du Merapi. Les courbes cumulatives des dépôts évoqués plus haut montrent effectivement une réduction de la valeur médiane Me de la taille des grains entre

l'échantillon S3 et Pu, séparés par près de 15 km. En effet, $Me_{S3} = -5,8 \phi$ (clastes caillouteux) et $Me_{Pu} = 1,4 \phi$ (sables moyens), montrant une réelle différence dans la taille du matériel présent dans les dépôts. Les différents lithofaciès analysés correspondent en outre au modèle de déposition défini par Vallance (2000), et rejoint les lithofaciès schématisés par Scott (1988), représentés par la Figure 106. Le modèle de dilution des lahars se traduit par un net changement dans les faciès sédimentaires, avec une grande variété de structures et de textures pour le talus distal. Cette caractéristique apporte un argument supplémentaire aux évidences géomorphologiques et à l'étude des dégâts (chap. 3 et 4) montrant que le talus distal du Merapi n'est pas épargné par des lahars de grande ampleur. Les histogrammes des échantillons analysés montrent bien la présence d'un matériel très grossier transporté jusque loin en aval sur le talus distal.

Les échantillons provenant du talus proximal présentent des distributions granulométriques bimodales typiques de coulées de débris, avec un pic très net dans les fractions grossières à -6ϕ ou $-6,5 \phi$, et un faible pic dans les fractions sableuses à 0ϕ ou 1ϕ . On retrouve cette tendance dans les couches K2 et B2 sur le talus médial. En revanche, S2 montre des pics moins affirmés, avec un mode majeur à -1ϕ , tandis que K3 est nettement plus fin avec une distribution trimodale et des pics à $0, 1$ et 4ϕ . Les dépôts de lahar sur les talus proximal et médial apparaissent ainsi très riches en fractions grossières, et sont nettement hétérométriques et mal triés. Sur le talus distal, les textures plus fines s'observent pour le dépôt « Putih » (deux pics à 1 et 5ϕ) et pour l'échantillon Op1, qui apparaît en outre mieux trié avec une distribution unimodale avec un mode à 1ϕ .

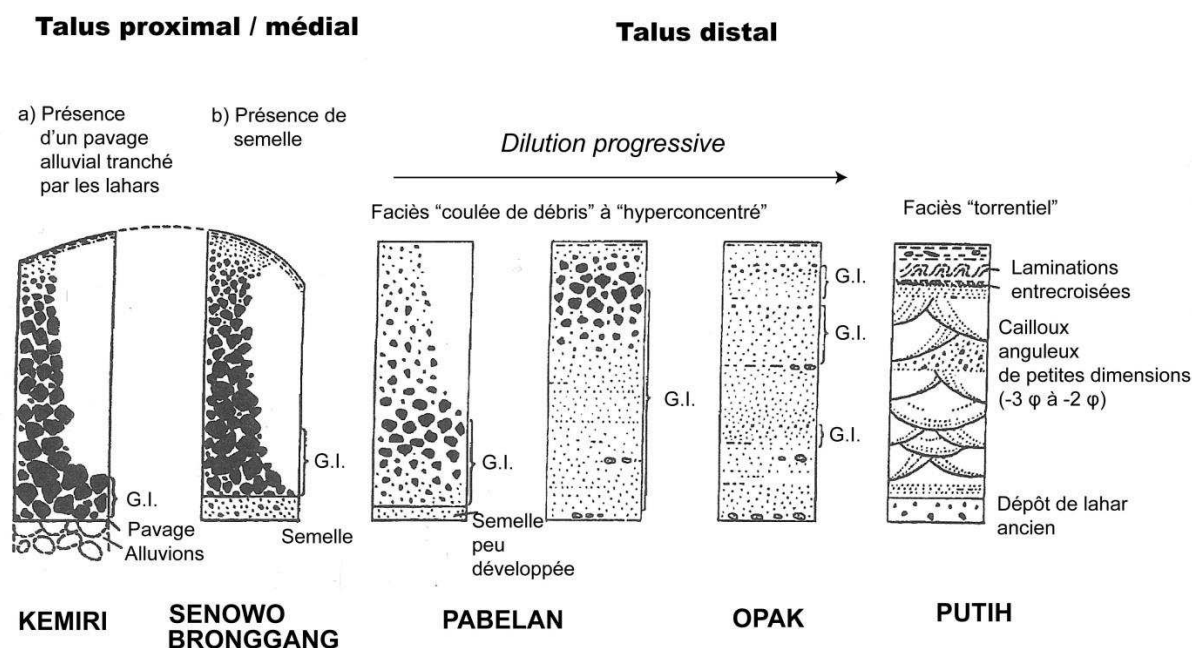


Figure 106 - Modèle de lithofaciès de dépôts (G.I. : Granoclassement Inverse) de lahars non-cohésifs depuis le talus proximal vers le talus distal adapté au cas du Merapi (modifié d'après Scott, 1988). La présence de semelle, toutefois, attestée par Scott (1988) pour les coulées de débris, n'est pas attestée dans les lithofaciès étudiés ici.

Cette première rubrique a mis en avant la forme des dépôts de lahars à travers l'étude de plusieurs coupes analysées sur les différents talus du volcan, depuis la zone proximale jusqu'aux espaces distaux. Les lithofaciès présentent tous des éléments communs, marqués par une très grande proportion des clastes de grandes dimensions, jusqu'à plus de 80 % du poids des échantillons sur le talus distal ; l'analyse des échantillons, couplée à l'analyse in situ et à l'étude de photographies, montre que ces matériaux grossiers représentent d'importantes proportions dans chaque couche. Les structures et textures sédimentaires des dépôts rejoignent celles des dépôts de coulées de débris et d'écoulements hyperconcentrés déjà étudiés au Merapi par Lavigne et al. (2000a, 2000b). L'évidence de coulées de débris à plus de 20 km du sommet dans la Pabelan, et l'examen comparé des courbes et histogrammes des différents échantillons analysés sur une large gamme granulométrique (-7 à +6 ϕ) montrent que les lahars peuvent conserver des modes d'écoulement très énergiques jusque sur le talus distal. L'intérêt de l'étude globale des lithofaciès individualisés montre que les lahars de certaines rivières demeurent d'intensité modeste, avec des dépôts moins épais et peu voire pas d'évidences d'épisodes puissants (Boyong), et d'autres rivières où au contraire les lahars peuvent s'avérer très énergiques (Pabelan). La fraction grossière se retrouve sur l'ensemble des espaces du Merapi affectés par les lahars. Pour préciser cette première présentation des faciès sédimentaires et des textures des dépôts de lahars, la rubrique suivante se focalisera plus spécifiquement sur les fractions fines, lesquelles forment la matrice des dépôts et la principale ressource exploitée dans les corridors.

II. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES FRACTIONS FINES

Les matériaux fins (< 2 mm soit > -1 ϕ) transportés par les lahars représentent une fraction qui peut représenter jusqu'à 85 % des dépôts. Les résultats exposés dans cette rubrique reposent sur 15 échantillons de matrice sableuse récupérés sur l'ensemble du volcan le long de 8 rivières (Figure 107 ; voir Annexe C.3), notamment celles où se déploie l'activité d'extraction des sables qui sera présentée dans la troisième partie de la thèse (chap. 6 et 7).

1. Textures et structures sédimentaires

1.1 Prédominance des sables grossiers

Les diamètres moyens des différents échantillons montrent que les formations fines apportées par les lahars sont de l'ordre des sables grossiers, avec des moyennes Mz oscillant autour de 0,6 mm soit 0,7 ϕ (Figure 108). Dix échantillons présentent des sables grossiers, avec des diamètres moyens compris entre 0,62 et 0,94 mm (soit $0,68 \phi \leq Mz \leq 0,8 \phi$). Les cinq autres ont des diamètres moyens situés essentiellement dans la catégorie des sables moyens, entre 0,23 et 0,49 mm (2,1 à 1 ϕ). Les valeurs médianes des grains sont comprises entre 0,14 et 0,9 mm ($0,1 \phi \leq Me \leq 2,8 \phi$). Les courbes cumulées présentent toutes des formes nettement centrées sur les fractions plus grossières, puisque les $\frac{3}{4}$ des sables ont systématiquement des diamètres supérieurs à 0,15 mm, voire à 0,4 mm (< 1,4 ϕ) pour deux échantillons (Figure 108). L'échantillon « Pondokrejo », prélevé dans la Krasak sur le talus distal, apparaît comme celui comportant le sable le plus fin, tandis que les sables de « Kemiricilik »

(Boyong, talus médial) sont les plus grossiers. Le détail par échantillon (voir annexe C.4) montre des distributions statistiques très similaires, avec trois échantillons qui se démarquent par des formes de courbes à tendance légèrement sigmoïde : Pondokrejo (Bebeng-Krasak), Sukorini (Woro) et Prambanan (Opak-Gendol). Il s'agit des trois échantillons prélevés le plus bas sur le talus distal du volcan.

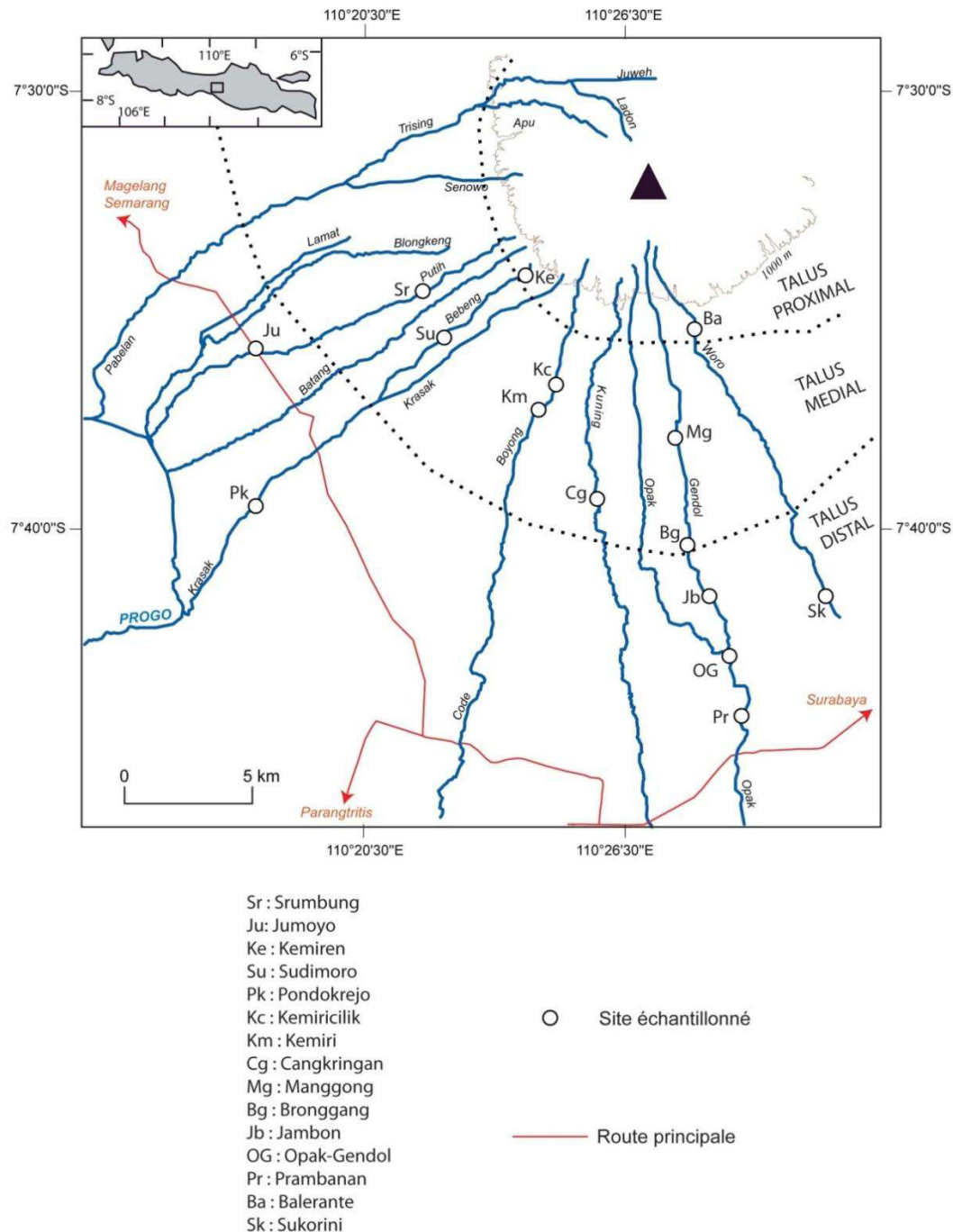


Figure 107 - Localisation des échantillons de sables dans les dépôts volcanoclastiques des flancs sud et ouest du Merapi

A

	Site	Rivière	Distance au cratère (km)	Moyenne M_z (ϕ)	Standard deviation σ (ϕ)	Coefficient d'aplatissement K_G (ϕ)	Asymétrie S_K (ϕ)
Proximal	Kemiren	Bebeng	6	0,54028346	1,4429008	1,01187314	-0,18148397
	Balerante	Woro	6	0,68087375	2,23102694	1,2054019	-0,4067252
	Moyenne des paramètres			0,6105786	1,8369639	1,1086375	-0,294105
Medial	Sudimoro	Bebeng	9	0,43220373	1,72609915	1,26620351	-0,35066214
	Kemiricilik	Boyong	8	0,08481874	0,90366138	0,9587761	-0,19313447
	Kemiri	Boyong	10	0,46817812	2,18549147	1,38295686	-0,48489291
	Manggong	Gendol	10	0,61674562	2,13195651	1,13753366	-0,43122328
	Srumbung	Putih	11	0,5360655	1,7672819	1,2783778	-0,33274619
	Cangkrikan	Kuning	13	0,62468013	1,7214253	1,21664902	-0,31075469
	Bronggang	Gendol	15	0,67733431	1,83032081	1,28502978	-0,26936148
	Moyenne des paramètres			0,4914323	1,7523195	1,2179324	-0,338968
Distal	Opak-Gendol	Opak	21	0,41784936	1,05254263	0,98180738	-0,11163585
	Jambon	Gendol	18	1,02645397	2,02486271	0,94986603	-0,21980384
	Prambanan	Opak	24	1,2113703	1,05422779	0,9275364	0,11575552
	Pondokrejo	Krasak	21	2,10218218	1,71012922	1,35294663	0,1605017
	Jumoyo	Putih	17	1,14085254	1,93250855	1,2113991	-0,1509784
	Sukorini	Woro	18	1,60186431	1,12228344	1,12329702	0,04048849
	Moyenne des paramètres			1,25009544	1,48275906	1,09114209	-0,02761206

PARAMETRES ET ECHELLE :

Paramètres granulométriques de Folk et Ward (1957) et Sk de Inman, 1952 :

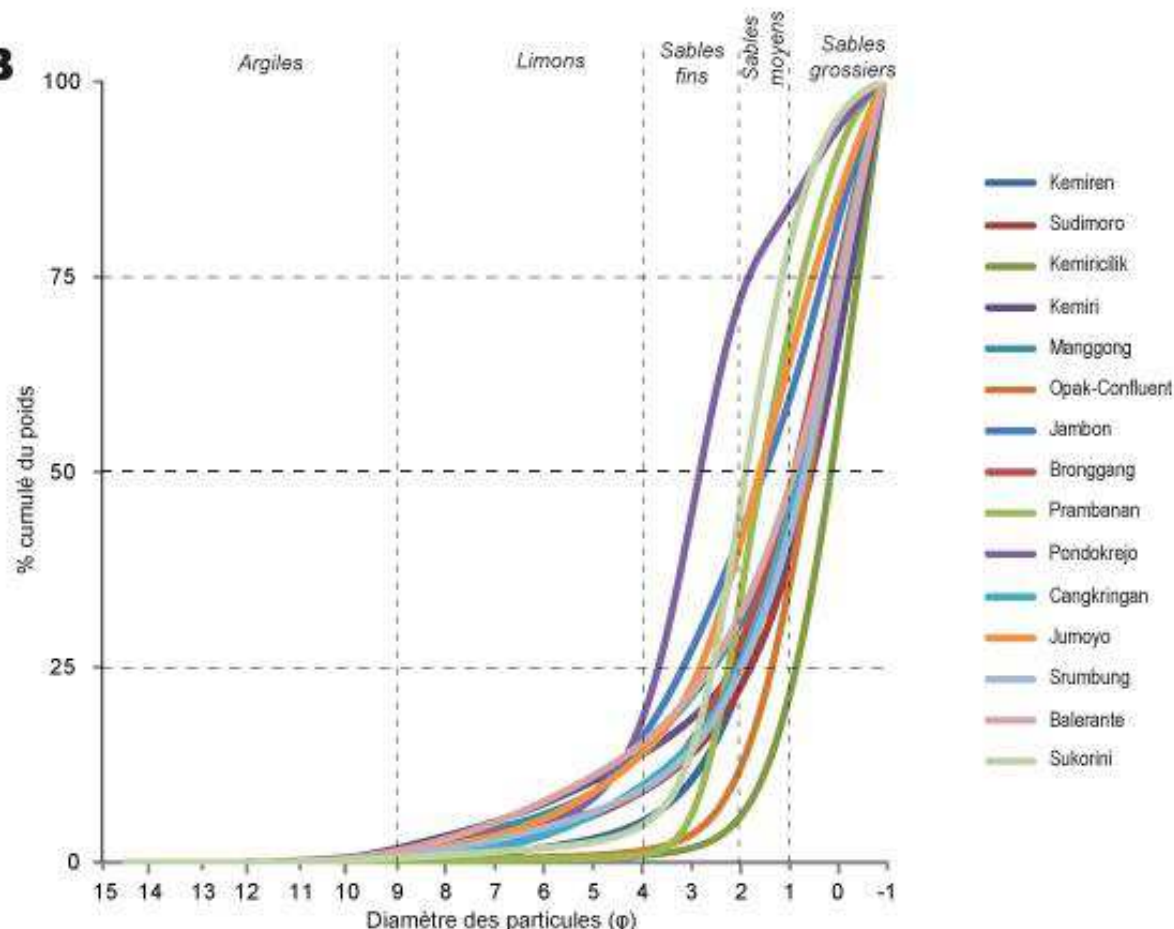
$$\begin{cases} M_z = (Q_{16} + Q_{50} + Q_{84})/3 \\ \sigma = (Q_{84} - Q_{16})/4 + (Q_{95} - Q_{5})/6,6 \\ K_G = (Q_{95} - Q_5)/2,44(Q_{75} - Q_{25}) \\ S_K = (Q_{16} + Q_{84} - 2Q_{50})/(Q_{84} - Q_{16}) \end{cases} \text{ avec } Q : \text{ quantiles de la distribution statistique}$$

Échelle ϕ :

$$\phi = -\log_2 d$$

avec d : diamètre en mm des particules

B



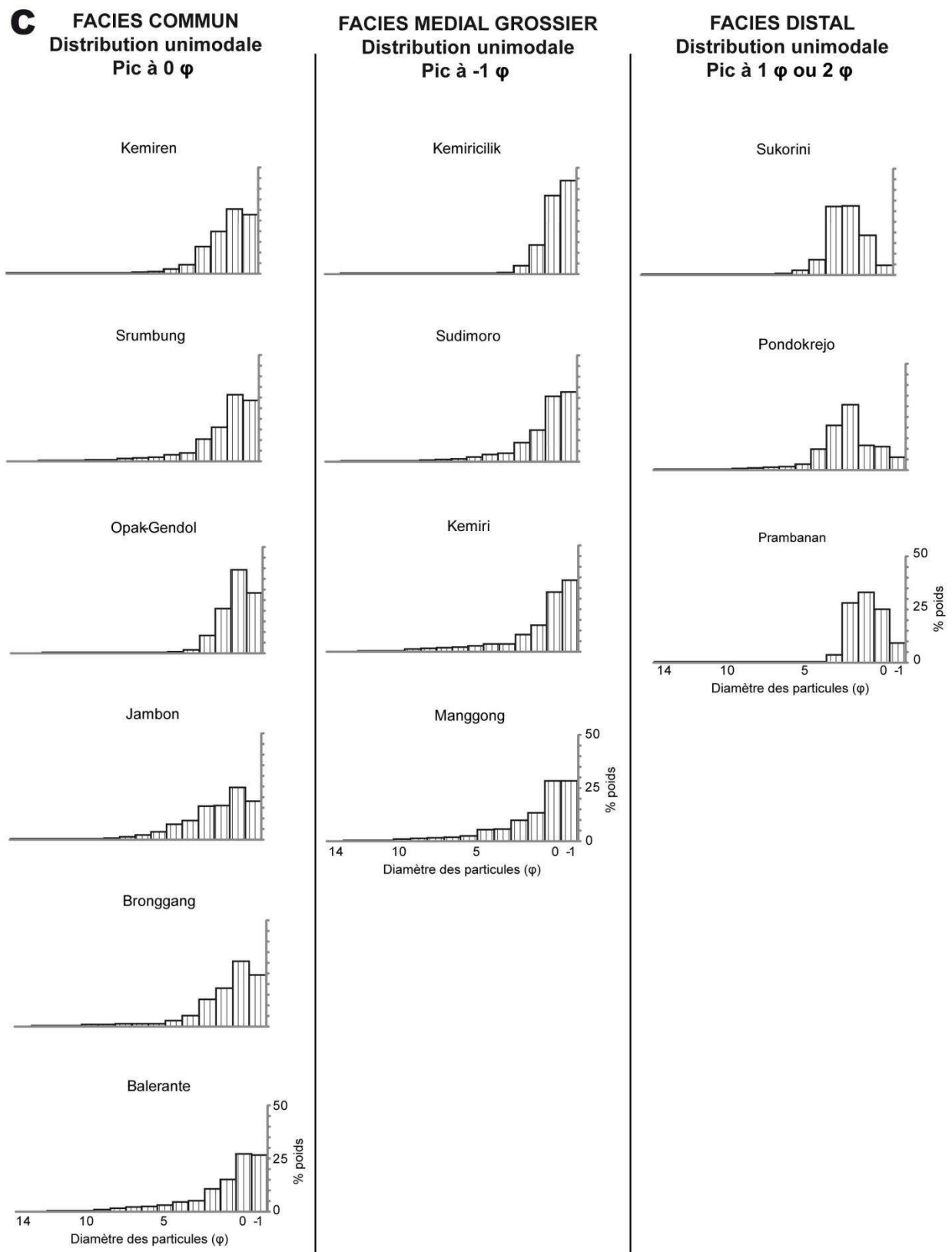


Figure 108 - Granulométrie des sables dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi
(A) Indices granulométriques (Inman, 1952 ; Folk et Ward, 1957), (B) courbes des fréquences cumulées par échantillon et (C) diagrammes des fréquences simples

L'examen des diagrammes de fréquences simples montre trois grands types de faciès sédimentaire des sables prélevés dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi. Le faciès commun concerne des distributions unimodales dont le pic est à 0 ϕ (sables grossiers). Il regroupe six échantillons sans distinction nette de provenance, puisque l'on y trouve les deux échantillons ramassés sur le talus proximal (Kemiren et Balerante), ainsi que Bronggang et Srumbung (talus médial). Deux échantillons du talus distal y sont également représentés : Jambon et Opak-Gendol (confluent). Leur texture grossière peut s'expliquer par la proximité des dépôts pyroclastiques de 2010 qui se sont arrêtés à hauteur de Bronggang, réduisant la distance de parcours des matériaux remobilisés par les lahars. En outre, dans le cas de Opak-Gendol, il s'agit d'un site de confluence recevant des apports sédimentaires en provenance de la Opak et de la Gendol, ce qui en fait un échantillon un peu à part compte tenu de sa dynamique hydrologique originale. Le second faciès est appelé « médial grossier » puisqu'il est caractérisé par des distributions unimodales au pic situé à -1 ϕ (sables très grossiers) provenant toutes du talus médial du volcan. Ils correspondent à des phases de déposition de lahars encore peu dilués, au contraire du faciès « distal ». Les trois échantillons de ce type présentent un sédiment volcanoclastique de sable moyen avec une distribution unimodale dont le pic est à 1 ou 2 ϕ .

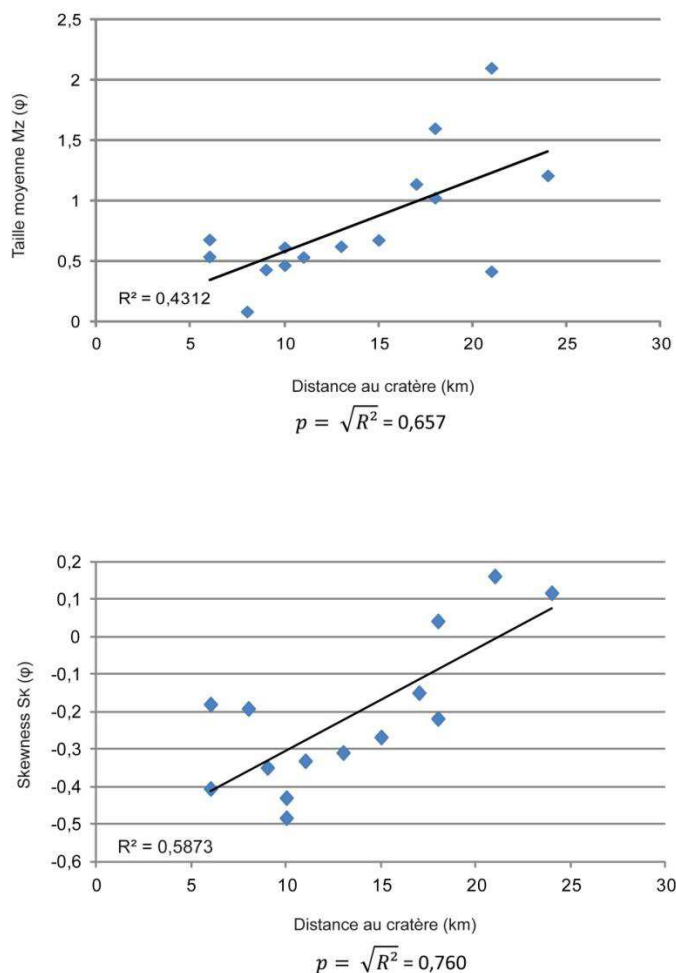


Figure 109 - Distance au cratère des échantillons et granulométrie

transparaît une meilleure représentation des sables moyens et fins, mais pas de manière significative toutefois, notamment à cause de fractions fines visibles sur le talus médial.

La relation entre la distance au sommet du volcan et la taille moyenne (en mm) des grains des matrices sableuses en Figure 109 apparaît assez évidente (coefficient de corrélation $p = 0,657$). L'asymétrie des courbes (Skewness S_K) révèle une tendance nette à une forte représentation des grains les plus grossiers : 6 échantillons présentent une asymétrie très forte ($-1 \phi < S_K < -0,3 \phi$) et 5 une asymétrie forte ($-0,3 \phi < S_K < -0,1 \phi$). Seuls 4 échantillons présentent des courbes d'aspect quasi-symétrique voire asymétrique vers les fines ($S_K > -0,1 \phi$). Ces échantillons sont ceux des sites localisés les plus loin en aval sur le talus distal. La relation statistique entre la valeur de S_K et la distance au cratère montre une corrélation positive (coefficient de corrélation $p = 0,760$). La tendance à l'asymétrie et à la surreprésentation des éléments grossiers diminue ainsi à mesure que l'on s'étend sur le talus distal. Les sables grossiers se retrouvent dans l'ensemble des différents talus du volcan, toutefois en proportion légèrement moindre sur les parties les plus distales des rivières, où

1.2 La faible teneur en limons et en argiles

Les échantillons, qu'ils soient composés de sables grossiers ou de sables plus fins, contiennent tous de faibles quantités de particules limoneuses et argileuses dont la proportion reste systématiquement inférieure à 15% (Figure 108 et Figure 110). Les pourcentages font en moyenne apparaître à peine 1 % d'argiles ($< 2 \mu\text{m}$ soit $> 8 \phi$) et 7% de limons (de 2 à 50 μm , soit 4 à 8 ϕ). La teneur en argiles est un élément important des dépôts de lahars et de coulées de débris en général, puisqu'elle permet d'en déduire la cohésion du flux. Dans le cas du Merapi, où la teneur en argiles est systématiquement inférieure au seuil de 5 % de Pierson (1995) parfois abaissé à 3% (Scott *et al.*, 1995 ; Capra *et al.*, 2004), les lahars prennent la forme d'écoulements non-cohésifs. Peu de matériel altéré est ainsi remobilisé puis transporté ; l'essentiel du transfert sédimentaire concerne principalement des sables grossiers directement issus des dépôts pyroclastiques. Cette caractéristique joue un rôle essentiel dans la qualité marchande du sable, puisque les dépôts de lahars du Merapi sont presque uniquement composés de matériel volcanique non altéré.

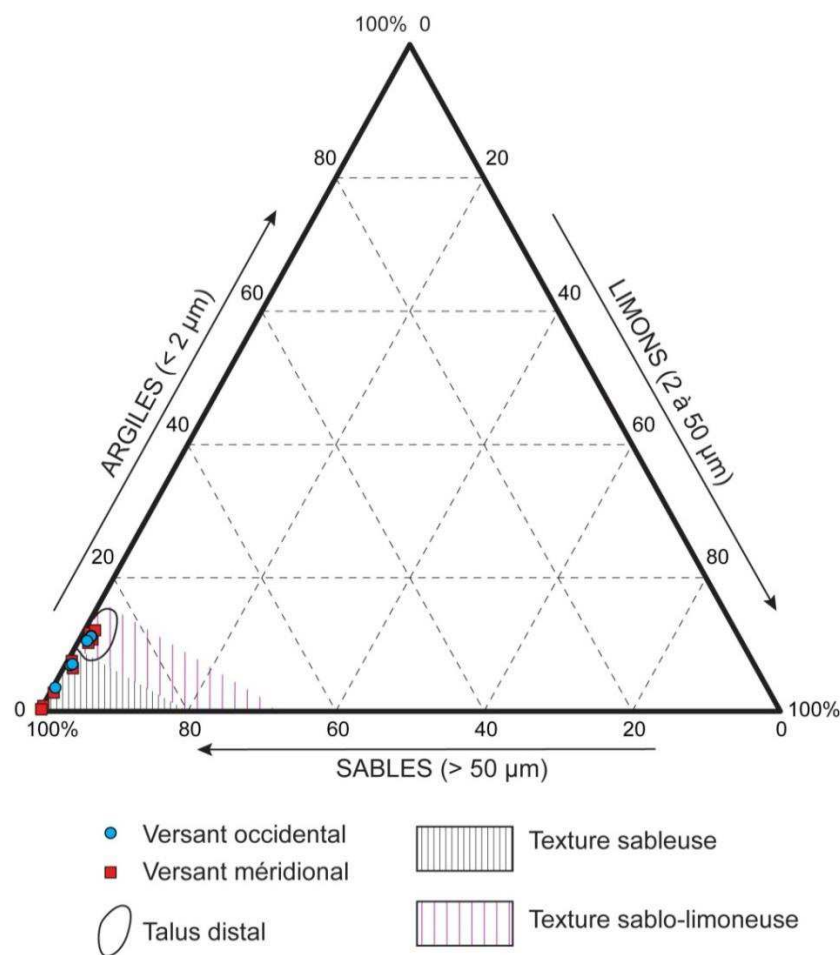


Figure 110 – Diagramme triangulaire des textures des échantillons de sable dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi

1.3 Un tri inexistant

L'analyse sédimentologique montre des fractions fines mal triées voire très mal triées, avec des indices de tri ou *standard deviation* (Folk et Ward, 1957) compris entre 0,90 et 2,23 ϕ (Figure 108). La seule exception vaut pour l'échantillon prélevé dans la partie amont de la Boyong à Kemiricilik, qui

indique un indice de tri modéré. Les échantillons très mal triés sont répartis sur l'ensemble des sites de prélèvement ; quant aux échantillons mal triés, on les retrouve même dans les parties les plus basses du talus distal. Le sable transporté depuis l'amont vers l'aval des rivières du Merapi est ainsi un matériel où les grains les plus grossiers sont mélangés aux plus fins, y compris sur les sites les plus distaux : le tri n'est pas meilleur vers l'aval.

De même, le coefficient d'aplatissement de la courbe granulométrique (Kurtosis K_G) montre une distribution K_G leptokurtique ($1,11 \varphi < K_G < 1,50 \varphi$) pour la majorité des échantillons (10), lesquels ont des valeurs extrêmes plus fréquentes et traduisent un mauvais classement de la médiane par rapport au classement des extrémités (Figure 108A). Cette caractéristique a déjà été constatée au Merapi par Lavigne et Thouret (2002) pour la fraction sableuse des dépôts d'écoulements hyperconcentrés. Les 5 échantillons à distribution K_G mésokurtique ($0,90 \varphi < K_G < 1,11 \varphi$) ont des valeurs médianes mieux classées par rapport aux queues des courbes. Ils ne présentent pas de répartition spatiale particulière. Il n'y a pas de changement significatif dans la distribution de la taille des grains d'un échantillon selon qu'il a été prélevé en amont ou en aval ; les propriétés sédimentologiques d'un tri inexistant se retrouvent sur l'ensemble du Merapi, aussi bien sur le talus proximal que sur le talus distal du volcan.

2. Répartition des sables du Merapi

2.1 Homogénéité et hétérogénéité des échantillons

Ni la texture ni la structure interne des échantillons analysés ne permettaient de montrer une franche progression granulométrique entre les sables du talus proximal et ceux du talus distal, bien qu'une tendance à la réduction de la taille des matériaux existe. La mise en relation des différents éléments de texture et de structure sédimentaires des matrices sableuses permet de discuter la variabilité de la répartition spatiale des dépôts plus en détail.

Le croisement de la taille moyenne des grains (Mz) et du paramètre de *standard deviation* (σ) montre (Figure 111A) que les plus grandes proportions de matériaux fins sont néanmoins tous situées sur le talus distal, où le tri est légèrement meilleur, avec des distributions d'ailleurs plus symétriques (Figure 111B). La mise en relation de la taille moyenne (Mz) à l'asymétrie (S_K) met en évidence l'aspect grossier des sables volcanoclastiques du Merapi ($Mz < 1 \varphi$ et $S_K < -0,1$), en individualisant toutefois les dépôts du talus distal : les sables moyens et fins sont repérables dans les échantillons provenant du talus distal seulement. Le croisement des différentes formes de distribution des valeurs granulométriques données par l'asymétrie des courbes (S_K) et le coefficient d'aplatissement (K_G) montre à lui seul la grande variabilité des types de sables au Merapi (Figure 111C), dont les structures sédimentaires ne semblent pas dépendantes de la distance parcourue avant déposition. Les deux types de structures les plus représentés sont : une distribution asymétrique vers les fractions grossières d'aspect leptokurtique, ainsi que la même asymétrie associée cette fois-ci à un aplatissement mésokurtique. Ils mélangent des échantillons provenant de l'ensemble du volcan. Toutefois, la plupart des prélèvements effectués sur le talus distal échappent à cette typologie, et montrent des profils, notamment l'asymétrie, un peu différents. Cette caractéristique est mise en évidence lors de l'étude comparée de l'asymétrie avec la *standard deviation* (σ). Près des deux tiers des échantillons représentent une distribution granulométrique asymétrique vers les fractions grossières, pour un indice de tri extrêmement variable et une localisation indifférenciée sur l'édifice volcanique (Figure 111D). En revanche, les sites du talus distal se distinguent une fois encore par la présence d'un matériel moins riche en éléments grossiers et mieux triés, surtout sur le flanc sud.

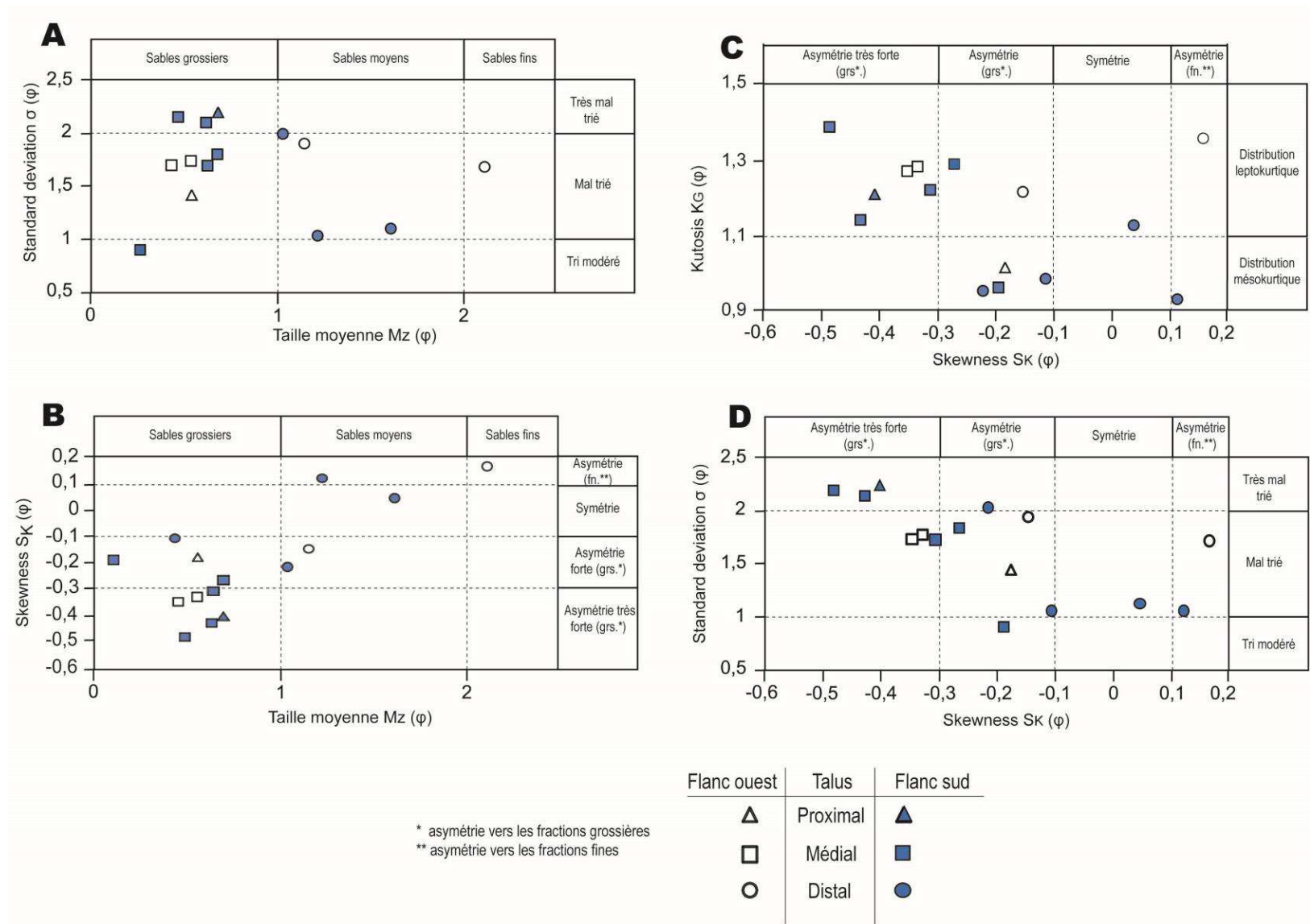


Figure 111 - Analyse granulométrique comparative des échantillons de sable dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi

En outre, la composition granulométrique des sables du talus distal est nettement plus variée que celle des talus médial et proximal. La Figure 110 montre d'ailleurs que les textures sablo-limoneuses sont uniquement repérables sur le talus distal. Il y a donc une rupture nette dans la dynamique morphosédimentaire entre les auréoles proximale et médiale d'une part, et l'auréole distale du volcan d'autre part, où la proportion de particules fines est plus importante. Cela est dû à la dilution de l'écoulement en aval, lorsqu'il a déjà déposé la majeure partie de sa charge grossière, comme cela a déjà été observé sur les dépôts de lahars du Merapi comme sur ceux d'autres volcans composites (Pierson et Scott, 1985; Pierson, 1995; Cronin *et al.*, 1997; Lavigne *et al.*, 2000a, 2000b; Lavigne et Thouret, 2002). Ceci dit, cette dilution demeure limitée : les lahars conservent encore loin en aval des modes de déposition propres aux écoulements hyperconcentrés voire aux coulées de débris, puisque le tri demeure unilatéralement mauvais sur l'ensemble des matrices sableuses échantillonnées. Les structures sédimentaires, de ce point de vue, sont effectivement très homogènes et ne permettent pas de différencier les échantillons en fonction de leur provenance.

2.2 Une différenciation granulométrique entre les versants occidental et méridional ?

L'examen comparé des courbes granulométriques regroupant les échantillons du sud et ceux de l'ouest montre un très léger décalage vers les fines des matériaux provenant de l'ouest du Merapi (Figure 112). Les médianes des courbes granulométriques cumulatives des échantillons du versant sud sont comprises entre 0,1 et 1,9 ϕ (0,9 et 0,3 mm), la moitié ayant des tailles médianes de 0,1 à 0,8 ϕ (0,9 à 0,6 mm). En revanche, les matrices sableuses des vallées du sud-ouest (Putih, Bebeng et Krasak) ont tendance à présenter des matrices plus fines que celles du versant méridional, avec des tailles médianes comprises entre 0,6 et 2,8 ϕ (0,7 à 0,1 mm). Cette différence aussi modeste soit-elle peut être expliquée par la nature granulométrique plus fine de la zone source des lahars sur le versant occidental après l'éruption de 2010. La part plus élevée de sables fins dans les matrices prélevées sur le versant occidental provient des dépôts de retombées aériennes de l'éruption de 2010. Surono *et al.* (sous presse) ont estimé à 0,01 – 0,02 km³ le volume des tephres ainsi déposés, qui correspondent à des éléments de diamètre réduit (cendres, voire quelques lapilli plus ou moins vésiculés et accréionnés). Ces éléments sont dans l'ensemble beaucoup plus homogènes que ceux des dépôts de coulées et de déferlantes pyroclastiques qui recouvrent l'essentiel du versant méridional.

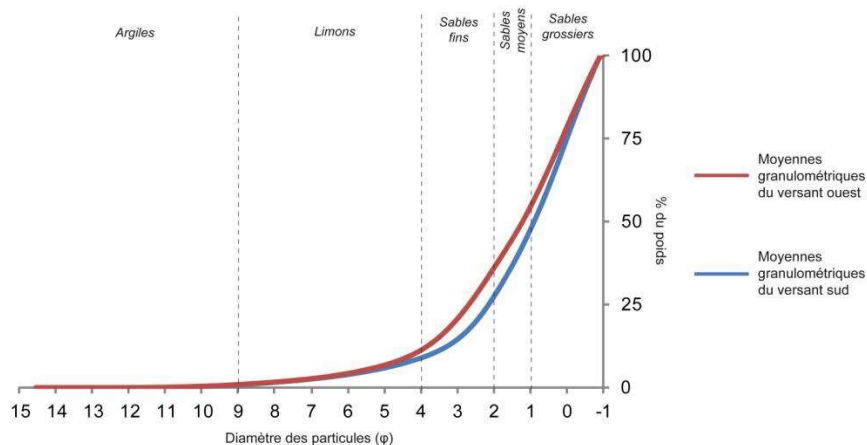


Figure 112 – Courbes granulométriques des dépôts de lahar des versants ouest et sud du Merapi

L'homogénéité des sables du Merapi ne doit pas masquer certaines variations de textures qui permettent d'isoler des secteurs où le sable est moins grossier : les parties les plus distales des rivières

(dilution progressive des lahars), et, dans une certaine mesure, le secteur occidental du Merapi (présence d'un stock de retombées pyroclastiques aériennes en amont).

3. Sables et activités humaines dans les corridors de lahars

3.1 Le matériel volcanoclastique sur les flancs du Merapi après les lahars de 2010-2011

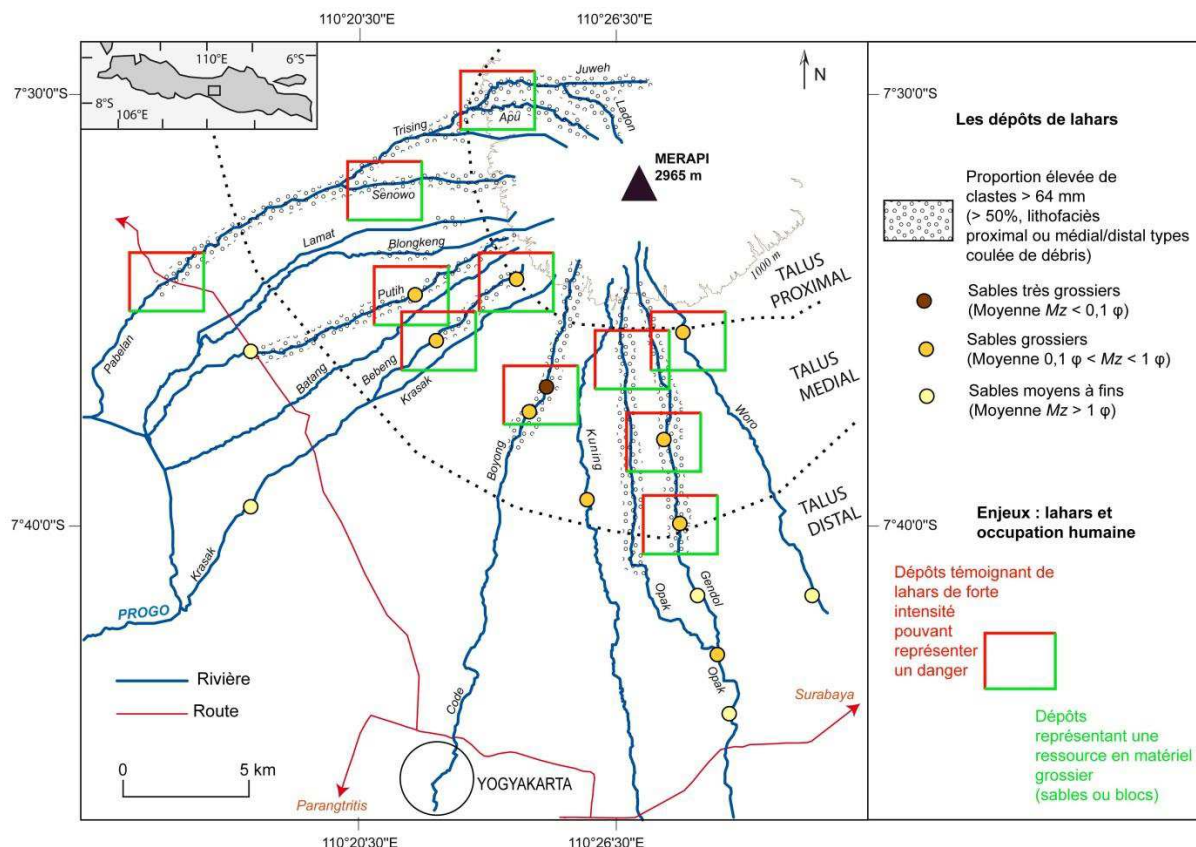


Figure 113 - Les dépôts de lahars du Merapi : répartition et enjeux sociétaux

La Figure 113 résume la localisation des sites où le sable a tendance à être plus grossier ou plus fin. La limite choisie est celle de la taille minimale des sables grossiers à $+1 \phi$, soit 2 mm de diamètre. La distinction entre les échantillons récupérés sur le talus distal et ceux récoltés plus en amont apparaît nette, à une exception près au niveau du confluent entre les rivières Opak et Gendol. La localisation des principales zones de déposition des formations grossières permet d'abord de distinguer les différents espaces du danger, où destruction et/ou ensevelissement progressifs sont avérés. L'analyse des dépôts permet d'apporter des éléments d'explication supplémentaires du risque, en mettant en avant les espaces du talus distal exposés à des dynamiques de déposition de matériel grossier potentiellement dangereux, notamment dans la Pabelan, exposée à des coulées de débris d'une grande intensité dont les débordements peuvent s'avérer extrêmement dommageables (rivières Putih, Opak et Gendol).

3.2 Vallée verte et vallée grise, de l'agriculture aux carrières

Les fonds de vallée dans lesquels coulent les rivières sur les talus proximal et médial ont été recouverts de dépôts volcanoclastiques sur des épaisseurs moyennes dépassant parfois 2 m (cf. *supra*) et ont subi un changement drastique de l'occupation des sols. Dans les bassins versants qui n'ont plus été affectés par les lahars depuis plus d'une décennie avant l'éruption de 2010, les corridors de lahars représentait un espace idéal pour l'agriculture : plus de 500 000 m² étaient ainsi disponibles dans le fond de vallée de la Senowo près de Mangunsuko, contre plus d'1 millions de m² dans l'aval de la Gendol ou dans la Boyong (d'après les mesures de dimensions des dépôts de lahars). La transformation des dépôts volcanoclastiques en terrain agricole prend 5 ans, mais les sols ne sont vraiment riches et fertiles qu'au bout de 10 ans (Supangkat, 1988). Le processus est dénommé *mbribik-mbribik* en javanais, et requiert un long travail d'aménagement des abords de la rivière. Au début de la saison des pluies, les clastes de la dimension des cailloux sont utilisés pour bâtir de petits bassins d'irrigation rectangulaires, alimentés par l'eau de la rivière (Figure 114). De la boue se forme peu à peu, décante puis durcit pendant la saison sèche ; au fil des saisons et de l'engraisement naturel se constitue ainsi un sol apte à être cultivé. Dans les petits bassins sont plantés des rizières, des cultures fruitières ou du cresson, parfois du manioc, servant essentiellement à la consommation locale. Les vallées « vertes » constituent toutefois une mise en valeur temporaire d'un espace très dépendant des éruptions du Merapi. Les sols agricoles sont issus de l'aménagement des dépôts volcanoclastiques ; lorsque les lahars sont de nouveaux fréquents, notamment après une éruption majeure comme celle de 2010, leurs nouveaux matériaux recouvrent les cultures, qui ne peuvent être réaménagées que lorsque le stock remobilisable en amont s'épuise. En attendant, la vallée « grise » a beau momentanément empêcher les activités agricoles, elle n'est pas pour autant un espace vide.



Figure 114 - Exemples d'aménagement agricoles des corridors de lahars dans le fond de vallée de la Senowo (clichés E. de Bélizal, août 2009)

Dans les dépôts laissés par les lahars sont aménagées des carrières destinées à recueillir du sable ou des blocs pour produire du béton, des pierres de taille ou des ouvrages d'art. En 1988, Supangkat estimait que dans les vallées du volcan Kelut (Java-Est) l'extraction de matériel volcanoclastique représentait jusqu'à 30% des revenus d'une communauté rurale. Au Merapi les blocs mais surtout les sables représentent également une ressource précieuse, dont l'un des critères de qualité majeur est la granulométrie des sables. Les différences de prix de vente sont réelles selon que l'on vend du sable plus fin ou du sable plus grossier. La répartition spatiale des dépôts évoquée plus haut

peut donc offrir une double lecture : d'une part, des informations sur la dynamique des lahars et leur potentiel destructeur ; d'autre part, une répartition des différents types de matériaux exploitables, discriminant notamment les sites où le sable est plus fin de ceux où il est plus grossier, donc plus cher. Cette dimension dialectique des dépôts volcanoclastiques est fatalement liée aux aléas, qui sont les vecteurs de cette ressource. Or si les dépôts les plus grossiers sont situés sur les talus proximal et médial, cela signifie que les meilleurs sites d'extraction et donc les plus exploités ne se trouvent pas loin en aval, là où les lahars ne s'étendent pas systématiquement. La carte des dépôts (Figure 113) devient ainsi une carte de ressource dont l'interprétation se fait en négatif du danger que suggèrent les dépôts présents. Au lieu d'être un espace évité, les abords des rivières du Merapi sont un espace attractif, dont la dynamique polarisante met en danger ceux qu'elle attire. Les lahars ne menacent pas que les habitants et les infrastructures ; ils menacent également ceux qui travaillent aux abords des rivières, car ils en *dépendent*. Cette caractéristique du risque nécessite une investigation poussée, proposée dans la troisième partie de la thèse, permettant de comprendre le fonctionnement de l'activité d'extraction et sa relation problématique aux capacités et à la vulnérabilité des populations locales.

L'analyse de la fraction fine (< 2 mm soit > -1 ϕ) des dépôts de lahars, qui en constitue la matrice sableuse à sablo-limoneuse, révèle une grande homogénéité de texture et de structure sédimentaires. Les échantillons prélevés sur l'ensemble du Merapi sont composés essentiellement de sables grossiers à teneurs très faibles en limons et en argiles, et présentant un tri quasiment absent. On retrouve les caractéristiques de dépôts de lahars non-cohésifs déjà signalés par Lavigne et al. (2000a, 2002). Si la taille des grains ne diminue pas de manière régulière le long de la pente, on constate cependant que l'ensemble des échantillons récoltés sur le talus distal du volcan présentent des granulométries plus fines ; par ailleurs, les échantillons récupérés sur le versant occidental tendent à avoir des proportions de fines plus élevées que ceux du versant sud. Ces résultats permettent d'élaborer une typologie des sables déposés par les lahars, dont la représentation spatiale permet d'affiner la compréhension de l'aléa et les différents espaces du danger. En l'associant à la répartition spatiale des lithofaciès type « coulées de débris » est produite une carte des dépôts permettant de préciser les remarques déjà faites aux chapitres 3 et 4 sur les espaces menacés, en expliquant le type de matériel susceptible de frapper habitations et champs. Cependant, les dépôts volcanoclastiques ne demeurent pas en l'état bien longtemps, et sont rapidement utilisés par les communautés locales, pour être transformés en terrains agricoles et/ou en carrières pour rechercher notamment les sables grossiers. La carte de dépôt peut donc être interprétée d'une seconde manière, non plus selon le prisme du danger, mais selon celui de la ressource : les zones où les dépôts sont composés de sables grossiers voire de blocs d'abord considérées comme dangereuses, deviennent des espaces attractifs d'exploitation d'une ressource prisée.

Les dépôts de lahars du Merapi présentent des lithofaciès plus ou moins massifs de coulées de débris et d'écoulements hyperconcentrés jusque loin sur le talus distal du volcan. La géométrie des dépôts a permis d'en estimer *a minima* le volume à environ 0,026 km³ (26 millions de m³) pour la seule saison des pluies 2010-2011. Ce chiffre assez élevé est proche du volume total de tephras émis lors de l'éruption de 2010 estimé entre 0,03 et 0,06 km³ (Surono *et al.*, 2012), et est dû à une dynamique de *bulking* et *debulking* particulièrement intense, notamment dans les zones distales des rivières qui ont subi d'importants changements en quelques mois (chap. 3 et 4). Les dépôts se caractérisent notamment par une proportion élevée de matériel clastique de grandes dimensions, que l'on retrouve jusqu'à près de 20 km du sommet dans le cas de la Pabelan. Des corridors où s'écoulent des lahars particulièrement intenses peuvent ainsi être délimités, et participent à une meilleure appréhension de la nature de l'aléa lahar, notamment dans les zones densément habitées et très exposées aux débordements en aval des rivières. Deux rivières méritent ainsi une surveillance accrue, de par les changements morphologiques qu'elles ont pu connaître très rapidement (chap. 3), par les dégâts recensés (chap. 4) mais également par les évidences d'un transport d'une grande quantité de matériel volcanoclastique. La Pabelan apparaît susceptible d'être frappée par des coulées de débris massives, et la Putih est marquée, tout en aval, par une dynamique de déposition liée à des lahars très dilués. L'examen des lithofaciès a permis de montrer la variabilité des dépôts depuis le talus proximal jusqu'au talus distal, et de démontrer que leurs dynamiques de déposition sont liées à la progressive dilution des lahars, selon des processus déjà mesurés par Scott (1988), Pierson (1995) ou Vallance (2000).

Le matériel grossier est contenu dans une matrice sableuse dont l'analyse granulométrique détaillée permet d'affiner les caractéristiques sédimentologiques des dépôts de lahars. On y trouve une très grande homogénéité, avec toutefois une individualisation claire des dépôts situés sur le talus distal, où les sables sont globalement plus fins que ceux que l'on retrouve sur les talus proximal et médial.

Enfin, ce chapitre a mis en avant les processus d'anthropisation des dépôts, particulièrement importants à considérer sur un volcan tropical actif densément peuplé tel que le Merapi. L'utilisation des dépôts pour l'agriculture est le fruit d'un travail agricole patient d'amendement et d'engraisement du matériel déposé pour en favoriser la pédogenèse, à condition toutefois que la fréquence des lahars s'affaiblisse. En attendant, des carrières se développent pour en retirer les sables de préférence grossiers, ainsi, parfois, que les blocs. Cette activité met directement en relation les populations locales et les lahars qui sont les vecteurs du matériel volcanoclastique, d'une telle manière que les dépôts deviennent une ressource. Aussi, cette exploitation joue nécessairement un rôle dans la compréhension des risques liés aux lahars, qui ne frappent pas que les populations dans un village, mais aussi les personnes qui s'exposent pour récupérer du sable dans les corridors de lahars. La troisième partie de la thèse proposera une étude de cette exploitation, de son fonctionnement, de ses réseaux, de ses enjeux, pour tenter de comprendre comment s'effectue ce travail, ainsi que pour lui donner la place qu'il n'a pas encore dans l'étude et la réduction des risques au Merapi.

SYNTHÈSE ET DISCUSSION

DE LA DEUXIÈME PARTIE

LES LAHARS DU MERAPI : UN RISQUE MAJEUR APRÈS L'ÉRUPTION DE 2010 ?

1. L'aléa lahar au Merapi après l'éruption de 2010-2011

1.1 L'intensité des lahars du Merapi

L'intensité des lahars du Merapi a été assez variable tout au long du XX^e siècle. Pendant et après l'éruption du Merapi survenue en 1930-1931 (Voight *et al.*, 2000a) des lahars de plusieurs millions de m³ ont été identifiés (Schmidt, 1934 ; Thouret *et al.*, 2000 ; Lavigne *et al.*, 2000a). Nourris par d'épais dépôts pyroclastiques, ils se sont propagés jusque sur le talus distal du Merapi, ont emporté plusieurs ponts et enseveli au moins un village. Mieux renseignés sont les lahars qui ont eu lieu depuis 1973 jusqu'aux années 1980 (Shimokawa *et al.*, 1995 ; Lavigne *et al.*, 2000b), ayant remobilisé vraisemblablement les dépôts des coulées pyroclastiques de 1969, de 1972 et de 1974 (Voight *et al.*, 2000). Ces lahars, survenus dans le sud-ouest du volcan (Putih, Bebung et Krasak) ainsi que dans le sud (Boyong et Kuning) ont détruit en 3 ans au moins 532 maisons, emporté 9 ponts et tué 38 personnes. Ces deux séries d'événements de forte ampleur sont survenues après une phase éruptive de forte intensité et de magnitude plus élevée que les coulées pyroclastiques d'effondrements de dôme plus habituels au Merapi durant le XX^e siècle (Voight *et al.*, 2000). Effectivement, après les coulées à blocs et à cendre de 1994 et de 2006, les lahars n'ont pas été particulièrement destructeurs. Ils sont restés confinés dans les chenaux encaissés des parties amont des rivières Boyong (Lavigne *et al.*, 2000b) puis Gendol, et n'ont pratiquement jamais atteint le talus distal du volcan. Les lahars de 2010-2011 marquent une rupture nette avec les lahars du XX^e siècle, avec notamment l'occurrence de quelques événements intenses en l'intervalle de quelques mois seulement.

Parmi les mesures effectuées au XX^e siècle, les lahars du Merapi d'intensité $Q_p > 600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ont été peu fréquents au, avec une seule occurrence estimée à $Q_p = 750 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en 1932 dans la Batang (Schmidt, 1934 ; Lavigne *et al.*, 2000a) et une autre à $Q_p = 2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dans la Putih en 1985 (Jitousono *et al.*, 1995). En moins de 3 mois, deux lahars à débit de pointe $Q_p > 1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ se sont produits (Putih 9 janvier 2011 ; Pabelan 30 mars 2011). La profondeur hydraulique maximale du lahar du 30 mars 2011 à Tamanagung dans la Pabelan ($P = 7 \text{ m}$) est similaire à celle d'un lahar survenu dans la vallée Putih en 1971, où une profondeur de 7 m avait été mesurée sur le talus distal également (Lavigne *et al.*, 2000a).

Concernant les quelques débits estimés par vidéo (Opak, Gendol, Kuning) montrant des valeurs de pointe à $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1} < Q_p < 600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ils correspondent aux mesures réalisées dans les années 1985-1988 par Jitousono *et al.* (1995) et dans les années 1995-1998 par Lavigne (1998), qui ont montré que 60% des lahars de la Putih et de la Boyong ne dépassaient pas des débits de pointe de $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Le maximum enregistré par Lavigne (1998) dans la Boyong en mai 1995 était de $Q_p = 360 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Il est toutefois difficile d'extrapoler ces quelques données ponctuelles pour en déduire une règle générale. Cependant, les profondeurs recensées par le BPPTK pour plus de la moitié des événements

recensés peuvent donner une idée de l'intensité (une faible profondeur impliquant *a priori* un faible débit). Les lahars de 2010-2011 ont rarement dépassé les 2 m de profondeur, ce qui rejoint les mesures faites par Lavigne *et al.* (2000a) pour lesquelles de telles valeurs étaient peu fréquentes. En définitive, l'intensité des lahars de 2010-2011 ne semblent pas exceptionnelle d'après ces premières estimations. Ce n'est d'ailleurs guère surprenant, dans la mesure où les lahars postéruptifs ont des profondeurs généralement inférieures à 3 m et des vitesses comprises entre 4 et 8 m/s, avec des débits de pointe entre 200 et 1200 m³s⁻¹ selon les observations de Pierson *et al.* (1996) après l'éruption du Pinatubo en 1991, même si les événements extrêmes peuvent avoir des débits de pointe estimés à $Q_p = 5000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Pierson *et al.*, 1996). Les lahars du Merapi qui ont immédiatement suivi l'éruption de 2010 ne présentent donc pas de valeurs inattendues ou exceptionnelles.



Figure 115 - Le talus proximal méridional du Merapi, bassin-versant Opak-Gendol.

Les déferlantes de 2010 ont anéanti les forêts du talus proximal du Merapi. Les interfluves sont désormais recouverts de dépôts pyroclastiques formant une couverture de sédiments fins, que le ruissellement abondant remobilise aisément. Repérer les ravines qui se développent sous l'effet des pluies de mousson (cliché E. de Bélizal, janvier 2011).

Les événements de grande intensité, avec des débits estimés à $Q > 1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ont été formellement recensés et mesurés par deux fois au moins jusque sur les talus médial et distal entre janvier et mars 2011. D'autres événements de grande intensité sont également suspectés, mais plutôt dans les parties amont des vallées où l'énergie de l'écoulement n'est pas encore dissipée : ainsi dans la Senowo (dépôts d'une coulée de débris massive survenue début janvier 2011, voir chap. 5). La fréquence d'occurrence élevée justifie peut être le nombre réduits en 2010-2011 d'écoulements intenses : la remobilisation du stock pyroclastique (et donc sa diminution) a été effectuée de manière progressive par plusieurs lahars modestes chaque semaine, ce qui a pu limiter au final l'intensité des

lahars les plus gros. La récurrence élevée en 2010-2011 s'explique non seulement par les précipitations abondantes en contexte de Niña, présentées au chap. 3, mais est due également au contexte postéruptif qui a suivi l'éruption explosive de 2010. Le matériel éruptif était plus abondant et distribué, parfois loin en aval, sous le cône actif, représentant un volume élevé de téphras remobilisables d'autant plus aisément que le talus proximal du Merapi avait été presque entièrement balayé par les coulées et déferlantes pyroclastiques. L'absence de végétation a favorisé le ravinement des interfluves des hauts versants du Merapi recouverts de dépôts pyroclastiques, et donc augmenté les facteurs de déclenchement des lahars (Figure 115).

1.2 Période de retour des phases lahariques

Tableau 28 - Périodes de déclenchement des lahars par rivière (1823-2010). Données reprises de Voight *et al.*, 2000 et de Lavigne *et al.*, 2000a

Rivière	Lahars référencés depuis le XIX ^e siècle
Ladon	2010-2011
Juweh	2010-2011
Apu	2010-2011
Trising	1888 ; 1969-1971 ; années 1980 et 1990 ; 2010-2011
Senowo	1832 ; 1888 ; 1930-1931 ; 1953-1956 ; 1961-1963 ; 1969-1971 ; années 1980 et 1990 ; 2010-2011
Pabelan	1832 ; 1930-1931 ; 1954 ; 1961-1963 ; 1969-1971 ; années 1980 et 1990 ; 2010-2011
Sat	1930-1931 ; années 1980 et 1990
Lamat	1832 ; 1930-1931 ; années 1980 et 1990 ; 2010-2011
Blongkeng	1832 ; 1888 ; 1930-1931 ; 1961-1963 ; 1969-1971 ; 1976-1978 ; années 1980 et 1990 ; 2010-2011
Putih	1969-1971 ; 1973 ; 1975 ; 1976-1978 ; 1985-1990 ; 1992-1993 ; 1998-2003 ; 2010-2011
Batang	1822-1823 ; 1888 ; 1930-1931 ; 1961-1963 ; 1969-1971 ; 1976-1978 ; 2010-2011
Bebeng	1962 ; 1969-1971 ; 1973 ; 1975 ; 1976-1978 ; années 1980 et 1990 ; 2010-2011
Krasak	1969-1971 ; 1973 ; 1975 ; 1976-1978 ; années 1980 et 1990 ; 2010-2011
Bedog	1994-1996
Boyong	1931-1932 ; 1969-1971 ; 1973 ; 1975 ; 1994-1998 ; 2010-2011
Kuning	1969-1971 ; 1973 ; 1975 ; 2010-2011
Opak	1969-1971 ; 2010-2011
Gendol	1846 ; 1906 ; 1931-1932 ; 1969-1971 ; 2006-2009 ; 2010-2011
Woro	1832 ; 1969-1971 ; 2006-2009 ; 2010-2011

En gras : lahars déclenchés suite à l'éruption de 1930

En italique : lahars déclenchés suite à l'éruption de 1969.

C'est la première fois depuis 1872 qu'une éruption explosive majeure dévaste l'ensemble du talus proximal du Merapi, favorisant le déclenchement des nombreux lahars de 2010-2011. À ce titre, ils peuvent être considérés comme participant des conséquences de l'éruption. En l'espace de six mois (fin octobre 2010 à début mai 2011) le nombre de lahars recensés (240) était pratiquement égal à la somme des occurrences survenues entre 1969 et 1978 (253), et supérieur au total des 195 lahars survenus entre 1930 et 1932. Ces différents chiffres sont certainement sous-estimés, dans la mesure

où certaines vallées sont très peu étudiées car peu accessibles comme la Juweh ou la Ladon. Cependant, ils permettent de mettre en avant les périodes pendant lesquelles les lahars ont été très fréquents au Merapi.

L'étude de la chronologie des lahars durant le XX^e siècle révèle récurrence de 40 ans exactement entre chaque série de lahars très fréquents (que l'on pourrait appeler « phase laharique ») sur plusieurs années, avec un ou deux événements plus puissants, et des dégâts particulièrement étendus et importants (Tableau 28 et cf. chap. 1). Ainsi les périodes de 1931-1932, et de 1969-1978, pendant lesquelles de nombreux hectares de cultures furent ensevelis, et plus d'une vingtaine de villages rayés de la carte (chap. 1). Les lahars de 1931-1932 se sont produits pendant et après la plus grosse éruption du Merapi au XX^e siècle, associée à l'effondrement d'un dôme de lave récent, mais aussi de toute une partie du complexe sommital du cône. Les dépôts ont été estimés à 0,02 voire 0,03 km³, soit une valeur assez proche des volumes éjectés par l'éruption de 2010. L'éruption explosive de 1969 n'a pas eu la magnitude ni l'intensité de celle de 2010, mais correspond là encore à une exception parmi la longue liste d'éruptions causées par effondrement de dômes du Merapi au XX^e siècle. Il semblerait que la récurrence des phases lahariques du Merapi soit liée aux dynamiques éruptives du volcan, les éruptions plus intenses (1931) ou explosives (1969 et 2010) associées à des téphras peut-être plus fins et plus facilement remobilisables, produisant ensuite des lahars fréquents parcourant de longues distances et pouvant causer d'importants dommages. Le rôle de la pluie n'est du reste pas à minorer non plus : la base de données de la NOAA (2012) montrent deux périodes de Niña dans les années 1970 (1970-1972, d'intensité moindre que 2010-2011 et 1974-1976, dont l'intensité est équivalente) qui ont pu, comme en 2010-2011, provoquer de fortes précipitations au Merapi et favoriser la remobilisation du matériel pyroclastique. Les phases lahariques comme celle de 2010 ne sont donc pas inconnues au Merapi, et semblent même se produire assez régulièrement dans le temps, notamment après des éruptions explosives. Une longue période de Niña peut prolonger la phase laharique pendant plusieurs années.

1.3 Le matériel transporté

1.3.1 Comment appréhender les rythmes de l'érosion du stock pyroclastique de l'éruption de 2010 ?

En l'absence d'une base de données renseignant précisément les débits, le *runoff* des lahars n'a pas pu être évalué de manière systématique pour estimer le rythme des transferts sédimentaires dans les différents sous bassins-versants du volcan. Les volumes de dépôts estimés au chap. 5 atteignent 0,03 km³ ; il est probable que la valeur soit sous-estimée, compte tenu d'incertitudes concernant les parties les plus en amont des rivières. Ce chiffre est cependant beaucoup plus élevé que celui des volumes de lahars qui ont suivi les coulées pyroclastiques d'effondrement de dôme (1,6 million entre 1994 et 1998, voir Lavigne et Thouret, 2002). La remobilisation du matériel juvénile est extrêmement rapide et abondante : en une saison des pluies après l'éruption de 1991, les lahars du Pinatubo avaient déjà transporté le tiers des téphras émis par les flux pyroclastiques (Pierson *et al.*, 1996). Pendant six mois après l'éruption de 1994, 60% du volume de dépôts pyroclastiques ont été remobilisés par les lahars du Merapi. La quantité parfois supérieure de matériel volcanoclastique déposé par rapport au stock pyroclastique proximal est liée au phénomène de *bulking* et à l'incorporation à l'écoulement de matériel volcanoclastique ou épicyclastique plus ancien. Le nombre de lahars en d'octobre 2011 à janvier 2012 a été moins élevé qu'à la même période en 2010-2011, avec respectivement 28 occurrences avérées contre 84. Cela est dû principalement à l'amenuisement du stock pyroclastique en amont, que le grand nombre de lahars de 2010-2011 a déjà largement remobilisé. La très faible teneur en argiles

des dépôts volcanoclastiques montre effectivement que les lahars ont principalement transporté du matériel juvénile. En revanche, cela ne réduit pas la probabilité d'occurrence des lahars pour les années à venir ; le cas du Pinatubo montre que plus du tiers du stock pyroclastique avait été évacué par les lahars pendant la saison des pluies qui a suivi l'éruption de 1991 (Pierson *et al.*, 1996), mais que les lahars se sont encore produits tout au long de la décennie 1990 (Gaillard *et al.*, 2001). L'instrumentation détaillée d'un bassin-versant en particulier (notamment celui de la Pabelan, de la Putih et de la Opak-Gendol) est nécessaire pour évaluer les rythmes de transfert volcanoclastique (à l'aide de calcul de *runoff* sur plusieurs bassins-versants, ainsi que des estimations des concentrations sédimentaires des lahars).

1.3.2 Des dépôts de lahars typiques d'un volcan composite tropical

La matériel volcanoclastique lui-même a été présenté au chapitre 5, qui a mis en avant la présence de clastes > 256 mm occupant près du quart d'une fenêtre de 1 m², mais a également insisté sur les caractéristiques granulométriques de la matrice sableuse interclastique des dépôts. Ceux-ci ne montrent pas d'architectures ou de textures sédimentaires inattendues, et montrent les mêmes lithofaciès que ceux observés dans d'autres produits de lahars postéruptifs au Merapi (Lavigne *et al.*, 2000a ; Lavigne et Thouret, 2002) ou au Semeru (Lavigne et Suwa, 2004) ou au Colima au Mexique (Saucedo *et al.*, 2008 ; Capra *et al.*, 2010). Le tri du matériel est toujours défini comme faible voire absent, et l'analyse statistique montre des distributions granulométriques bimodales voire trimodales typiques des coulées de débris, avec des pics à la fois dans les particules fines et dans les particules grossières. Dans les autres publications (Scott, 1988 ; Pierson, 1995 ; Vallance, 2000 et 2005 ; Lavigne *et al.*, 2004), on retrouve également le phénomène de dilution vers l'aval des lahars, démontré au chapitre 5 à l'aide de l'analyse de la répartition spatiale à la fois des lithofaciès en général, mais également de la matrice sableuse en particulier. Celle-ci a été observée au sud du volcan à plus de 24 km (bassin-versant Opak-Gendol) et 20 km (bassin-versant Putih), ce qui est supérieur aux chiffres observés par Lavigne et Thouret (2002), mais en retrait de ce qui fut observé au Pinatubo, où les lahars ont pu atteindre 50 km depuis la caldera (Pierson *et al.*, 1996).

2. Crise et gestion de crise

2.1 Crise ou catastrophe ?

À la lumière des dégâts provoqués par la force érosive des lahars et l'accumulation de leurs dépôts sur le talus distal du Merapi, s'agit-il d'une catastrophe en cours ? À l'évidence, les lahars ont perturbé le fonctionnement structurel des communautés vivant sur le talus distal du volcan. Les lahars ont emporté des ponts, isolant certaines parties du volcan ; ils ont coupé des routes, enseveli des champs, détruit des maisons. On peut cependant douter qu'il s'agisse réellement d'une catastrophe au sens strict, laquelle joue sur une échelle dépassant le seul niveau local, notamment par la nécessité de faire appel à de l'aide et à des acteurs extérieurs (Pigeon, 2010). Selon les définitions proposées par Leone *et al.* (2010), il semble plus cohérent de considérer que les lahars du Merapi en 2010-2011 entraînent une crise, plutôt qu'une catastrophe (Tableau 29). L'aspect catastrophique des lahars impliquerait une recomposition plus marquée de l'organisation spatiale du Merapi, notamment caractérisée par des dégâts et des mouvements de population bien plus importants et étendus que ceux observés pour l'instant. L'exemple type d'une catastrophe provoquée par les lahars postéruptifs est celui du volcan Pinatubo (Philippines). La catastrophe apparaît effectivement comme un « événement

hors du commun », « bouleversant les normes », comme une « rupture » (Tableau 29) compte tenu de ses conséquences économiques, sociales, psychologiques et spatiales.

Trois mois après la fin de l'éruption du Pinatubo (1991), les conséquences des lahars étaient particulièrement importantes. L'aggradation du lit de certaines rivières a dépassé les 25 m, et la formation des corridors de lahars s'est prolongée jusqu'à 40 km depuis le cratère (Hayes *et al.*, 2002 ; Pierson, 2005). Au Merapi, l'aggradation à proximité des principaux villages ensevelis (Sirahan notamment) ne dépasse pas les 7 m, et la formation des corridors de lahars ne s'étend pas au-delà du fleuve Progo (25 km à l'ouest) et au-delà des temples de Prambanan (24 km au sud). Les processus morphodynamiques des lahars du Pinatubo ont donc été bien plus puissants pendant la saison des pluies qui a suivi l'éruption que ceux du Merapi en 2010-2011, et ont causé des dégâts beaucoup plus étendus et plus graves. En 1992, ce sont 6 212 maisons qui furent endommagées par les lahars, soit presque dix fois plus qu'au Merapi en 2010-2011, et 53 000 personnes perdirent leur domicile (Janda *et al.*, 1996 ; Bautista, 1996 ; Gaillard *et al.*, 2001). En 1997, le nombre cumulé de maisons endommagées s'éleva à 30 922, suite aux lahars déclenchés chaque année depuis 1991.

Tableau 29 - Crise et catastrophe (modifié de Leone *et al.*, 2010)

Crise : le sinistre dépasse les moyens prévus LES LAHARS DU MERAPI (2010-2011)	Catastrophe ou crise majeure : la capacité de gestion de la société est dépassée ; rupture et faillite du système LES LAHARS DU PINATUBO (1991-1997)
Contraction du temps et dilatation de l'espace	Effet domino et crise durable
Faits insaisissables et incertitudes	Dissolution des repères structuraux : événement hors du commun
Procédures sous-dimensionnées et inapplicables	Procédures inadaptées et contre-productives
Éclatement des réseaux d'acteurs et conflits	Multiplication des intervenants
Conflits de responsabilités, de compétences, de clarté	Normes et hiérarchies bouleversées
Phase critique éprouvante	Diagnostic hors de portée
Problèmes de communication	Communication impossible, rupture des réseaux habituels
Indemnisation difficile	Système d'indemnisation dépassé par l'ampleur des dommages
Enjeux économiques, politiques et culturels	Enjeux fondamentaux de politique

Compte-tenu de l'ensevelissement de 42% de la SAU, le total de personnes qui ont été affectées par les lahars s'élève à plus de 200 000 (Bautista, 1996). La dimension catastrophique se comprend également par les perturbations sociales qu'elle a créées, avec dans certains cas une inversion des schémas socioéconomiques traditionnels : les propriétaires avaient tellement perdu qu'ils pouvaient du jour au lendemain se retrouver dans une situation sociale inférieure, rejoignant du coup – mais momentanément – les classes non-possédantes (Bautista, 1996). Gaillard *et al.* (2001) ont détaillé

le traumatisme qu'ont subi les victimes, en développant notamment les scènes de chaos lorsque les villages sont ensevelis par des lahars volumineux, et en étudiant les différents symptômes physiologiques traduisant le stress des personnes évacuées, qui ne se résorbe pas même un an après les événements subis. Enfin, l'ampleur des dégâts a été telle qu'il fut décidé de fermer certains secteurs du volcan, et d'en reconstruire les villages dans une zone moins exposée. L'abandon du territoire traditionnel du *barangay* ne fut toutefois pas aisé, et les personnes évacuées n'ont pas semblé s'être approprié le nouveau village que les autorités mettaient à leur disposition, ce qui a conduit à d'importants flux saisonniers, au lieu d'une migration définitive vers un espace sûr. Dans certains cas, lorsque les villages ne pouvaient être complètement abandonnés, les maisons étaient régulièrement réhaussées, accompagnant l'aggradation rapide de certaines rivières. Janda *et al.* (1996) estiment qu'en saison sèche, lorsque les lahars sont rares, la population des nouveaux villages d'accueil tombait sous le seuil des 25 000 personnes. Cependant, en temps de pluie, les effectifs pouvaient être multipliés par 6, et dépasser les 150 000 évacués (Mercado *et al.*, 1996). La structure spatiale du Pinatubo est ainsi profondément perturbée par les lahars.

À l'éclairage de ce qu'il s'est passé au Pinatubo, on comprend que l'ampleur des dommages et des impacts des lahars au Merapi en 2010-2011 ne suffit pas à en faire une situation catastrophique, mais plutôt une crise. L'intensité des lahars, mis à part quelques événements majeurs, n'a pas atteint celle de ceux qui ont frappé le Pinatubo. Les chenaux de lahars y sont moins nombreux qu'au Merapi (10 axes principaux, contre 18), ce qui a peut-être pour effet de concentrer les flux et de les rendre plus volumineux. En outre, le matériel rejeté par l'éruption plinienne du Pinatubo a atteint 6 km³, soit 100 fois que celle du Merapi en 2010. Enfin, les populations du Merapi sont peut-être moins surprises par les aléas d'origine volcanique que ne l'étaient celles du Pinatubo, qui n'était pas entré en éruption depuis le XV^e siècle. L'implication des communautés locales du Merapi pendant l'éruption s'est prolongée pour la surveillance des rivières, largement facilitée d'ailleurs par les nouvelles techniques de l'information et de la communication (voir chap. 4), ce qui n'était pas le cas en 1991.

2.2 Les limites de la gestion de crise

Les coulées de débris à récurrence irrégulière pouvant survenir dans des bassins-versants non volcanisés rendent très difficile la gestion des risques qu'elles peuvent causer, notamment à cause de la brutalité de leur déclenchement, ainsi que l'ont expliqué Lahousse et Salvador (1998, 1999) dans une étude sur le Briançonnais. Dans le cas des lahars du Merapi, si la récurrence élevée des lahars en saison des pluies limite l'effet de surprise, la rapidité de leur processus empêche la mise en place d'évacuations encadrées par le gouvernement. Tout au plus les autorités peuvent-elles lancer l'alerte lorsque des outils de détection performants (autrefois développés au Merapi, voir Lavigne *et al.*, 2000b) sont performants (Alfieri *et al.*, 2012). Toutefois, comme l'avaient déjà souligné Major *et al.* (2003), les aléas apparentés aux coulées de débris ne peuvent être gérés par les autorités seules compte tenu de ce délai d'action trop court ; c'est donc aux populations concernées d'être suffisamment averties pour prendre d'elles-mêmes les décisions qui s'imposent, et aux autorités scientifiques et politiques de communiquer et d'informer. Au Mont Rainier (Washington, États-Unis), les habitants reçoivent régulièrement des informations sur les modes de déclenchement des différents aléas, et notamment sur les prodromes des lahars (pluie au sommet du volcan, et bruit de martèlement sourd provenant de l'amont des rivières) pour pouvoir s'en prémunir (Driedger et Scott, 2008). Les autres usagers des espaces volcaniques comme les touristes doivent également être avertis des dangers auxquels ils peuvent s'exposer, nécessitant la présence de personnel qualifié : en Nouvelle-Zélande, l'ouverture de domaines skiables sur le talus proximal du Ruapehu a amené la publication de posters et

la formation de moniteurs spécialisés pour sensibiliser les usagers temporaires du volcan (Leonard *et al.*, 2008).

Une gestion unilatéralement top-down et hiérarchique organisée par des responsables politiques parfois éloignés de la réalité quotidienne des populations menacées n'est pas une solution efficace. Là encore, l'exemple du Pinatubo apporte des éléments de réflexion. Après l'éruption, le gouvernement et les scientifiques réunissant à la fois des Philippins et des chercheurs de l'USGS ont mis en place un système d'alerte progressif dont les différents seuils rappellent ceux utilisés en cas d'éruption volcanique. Chaque fois que le niveau 3 (« lahar confirmé ») était signalé sur un cours d'eau, les riverains étaient sommés d'évacuer, selon une technique de gestion hiérarchique de style *top-down* (Janda *et al.*, 1996 ; Bautista, 1996 ; Gaillard *et al.*, 2001) où le risque est géré par des responsables politiques et militaires, mais pas directement par les communautés elles-mêmes. L'approche technocratique *top-down* au Pinatubo, initialement nécessaire compte-tenu de l'ampleur des lahars, a malgré tout été à l'origine de nombreux problèmes notamment dans les nouveaux villages bâtis pour accueillir les sinistrés des lahars dans les années 1992-1993. Outre les évacuations parfois contraintes des habitants, les villages bâtis *ex nihilo* ne correspondaient à aucune réalité sociale et/ou urbaine philippine, et ont été imposées aux évacués sans que ceux n'aient pu participer à cette relocalisation qui pourtant les concernait (Bautista, 1996 ; Leone et Gaillard, 1999 ; Texier *et al.*, 2009). La méconnaissance de l'attachement au village natal s'ajoute à la mauvaise image véhiculée par les sites de relogement (Gaillard *et al.*, 2001), et finalement grève la gestion du risque sans en permettre la réduction.

A contrario, la gestion actuelle de la crise au Merapi semble plus efficace. Le chapitre 4 a montré comment s'organisait la surveillance des rivières et les méthodes d'alerte, entièrement réalisées par les populations locales aidées par quelques ONG. On échappe ainsi aux travers de la gestion imposée *top-down* pour une approche spontanée de type *bottom-up*, mais il manque néanmoins une structure, une vision d'ensemble de la gestion du risque. Même si les lahars sont de mieux en mieux surveillés, ni le BPPTK, ni P.U. (Travaux Publics), ni les gouvernements des districts du Merapi ne semblent préparer la construction de sirènes pour avertir les lahars, tant le système de surveillance communautaire apparaît adapté. Effectivement, la manière dont l'alerte est menée est un élément primordial : être averti à temps par un signal facilement identifiable permet aux populations menacées de pouvoir évacuer le plus vite possible. Il faut donc que le signal soit sans ambiguïté, et surtout que les populations menacées fassent confiance à ce signal, qui doit donc être crédible (Quarantelli, 1984). Selon Quarantelli (1984, 2001), un message personnel, donné aux personnes de vive voix par le téléphone, ou, mieux, par le porte à porte comme cela est pratiqué dans les villages menacés est un moyen d'alerte très efficace. Malgré tout, l'absence d'un système unique, officiel et institutionnalisé peut nuire à la clarté du message et à sa pertinence, et c'est là très certainement la grande limite de la gestion de crise *bottom-up* : l'absence de coordination institutionnelle. La démultiplication des acteurs de la gestion de l'aléa lahar présentée au chapitre 4 entretient une polyphonie incontrôlée qui risque de biaiser l'information, et de provoquer des fausses alertes, qui stérilisent à terme l'efficacité du système de surveillance, et mettent en danger les habitants. Quand plusieurs signaux sont utilisés pour avertir une communauté d'un danger, la multiplication des alertes brouille le message, et certaines personnes peuvent s'en trouver exclues, dans une proportion encore inconnue au Merapi. Dans les années 1990, après l'éruption du volcan Pinatubo en 1991, des systèmes d'alerte parallèles au système officiel rendaient le signal confus (Janda, 1996) : plusieurs types de messages étaient utilisés sans que les habitants d'un village ne sachent vraiment pour quel motif ; en outre, 70% des personnes exposées aux lahars ne recevait aucun signal d'alerte en dépit de leur grand nombre (Gaillard *et al.*, 2001). La confusion qui en résulte est contre-productive, et peut même accroître la vulnérabilité des populations menacées. La constitution de la base de données « lahars » (annexe A.1) a permis d'expérimenter directement certains travers des réseaux d'information, principalement sur les rivières Krasak et

Gendol, où un surveillant annonce un lahar, tandis que d'autres informateurs précisent qu'il ne s'agit que d'une inondation due à une crue de la rivière en cas de pluie intense, mais pas un transfert volumineux de matériel volcanoclastique. Sur le site internet de Jalin Merapi, annonce a été faite le 5 janvier 2012 qu'un lahar de la Pabelan avait emporté trois étudiantes ; en réalité, les victimes ont été surprises par une crue éclair dans des chutes d'eau à Wonolelo, qui ne transportait pas de matériel volcanoclastique d'après une enquête du BPPTK (N. Cholik, comm. orale, 2012). La confusion tient à une terminologie confuse des mots « lahar » et « inondation » en indonésien : si un lahar peut provoquer une inondation, toute inondation n'est pas forcément causée par un lahar.

2.3 Le sens du mot *lahar*

Comprendre l'aléa, c'est d'abord pouvoir le désigner sous un vocable exact et sans ambiguïté. Les travaux de terrain ont révélé l'existence d'une gamme variée de synonymes et d'épithètes plus ou moins légitimes du terme *lahar* qui complexifient la compréhension du phénomène, et qui méritaient d'être signalées ici. L'inégale connaissance de l'aléa lahar chez les habitants du Merapi diagnostiquée dans le questionnaire de décembre 2010 (chap. 4, annexe D.1) se reflète dans les usages, et notamment dans la presse.



Figure 116 – Reportage du bulletin d'informations télévisé de la chaîne Metro TV, appelant « lahar froid » la coulée de débris qui emporte le pont de Tlatar (rivière Pabelan, lahar du 15 janvier 2011).

La première confusion qui existe est la différence faite entre les lahars « chauds » et les lahars « froids ». Quelques auteurs ont utilisé la température comme indicateur de l'aspect syn-éruptif ou post-éruptif d'un lahar (Arguden et Rodolfo, 1990), les lahars synéruptifs étant généralement qualifiés de « chauds ». La relation est cependant moins évidente qu'il n'y paraît, et demeure finalement très

peu usitée dans la littérature scientifique récente. Les lahars de la Gendol survenus pendant la saison des pluies 2010-2011 étaient particulièrement chauds, même six mois après l'éruption (température du flux à 78°C le 21 mars 2011 d'après le BPPTK), tandis que ceux circulant dans les autres rivières n'apparaissaient pas aussi chauds (absence de panache de vapeur). Dans la revue de presse (1986-2011, voir annexe A.3) réalisée pour cette thèse, 248 articles font références aux lahars, et parmi eux 124 les désignent comme « lahar dingin » soit « lahars froids », ce qui s'avère parfois fautif : le 2 novembre 2010 et le 31 mars 2011, le quotidien *Kedaulatan Rakyat* appelle « lahars froids » les écoulements qui se sont produits dans la Gendol... alors qu'en réalité ils étaient à haute température. La télévision relaye également cette terminologie fautive (Figure 116). En revanche, le terme *lahar hujan*, que l'on peut traduire par lahar pluvial et qui est plus adapté à la réalité et au mode de déclenchement des lahars, n'a été trouvé que deux fois (21 février 1992 dans le quotidien *Suara Merdeka* et le 2 décembre 1997 dans le quotidien *Yogya Pos*).

Dans d'autres cas, c'est la nature même de l'aléa qui est mal traduite par la presse, les médias, et les riverains des corridors de lahars. Outre l'idée que les lahars sont de la « lave froide » (le terme *cold lava* est parfois utilisé dans les descriptifs de vidéos en ligne sur YouTube, voir annexe A.4), la presse évoque souvent le terme *banjir* qui apparaît à 128 reprises dans la revue de presse. C'est même ce mot qui est utilisé en cas d'alerte : « banjir ! banjir ! ». Le terme indonésien *banjir* désigne *stricto sensu* une inondation, et est théoriquement réservé pour désigner le débordement des cours d'eau en situation de crue, et non pas en cas de lahar. Il en résulte plusieurs dérivations pour distinguer différents types de *banjir*, et notamment « banjir lahar » qui théoriquement ne devrait pas être si les termes *banjir* et *lahar* étaient utilisés selon leur signification propre. Les chenaux des rivières du Merapi sont généralement agrandis par l'occurrence répétée des lahars en corridors de vastes dimensions (Figure 117), les lits mineurs n'en occupant généralement qu'une portion réduite. En cas de pluie toutefois, il est fréquent que les cours d'eau connaissent une augmentation de leur débit, et débordent parfois sur le corridor de lahars ; or cela n'en fait pas des lahars, parce que le flux ne transporte pas autant de matériel qu'un lahar, et de fait n'en possède pas les propriétés rhéologiques (coulées de débris ou écoulement hyperconcentrée). Les débits ne sont également pas comparables. Les mesures ponctuelles estimées sur le terrain à Plumbon montrent les valeurs suivantes pour chacune des situations A, B et C qui correspondent aux trois états dynamiques de la Gendol (écoulement fluvial – crue, ou banjir – lahar). Pour $Q = \text{Vitesse de surface} \times \text{Largeur} \times \text{Profondeur}$ (voir chap. 3) :

$$\begin{aligned} Q_A &= 1 \times 7 \times 0,1 = \mathbf{0,7 \, m^3 s^{-1}} \\ Q_B &= 2,5 \times 25 \times 0,9 = \mathbf{56,3 \, m^3 s^{-1}} \\ Q_C (\text{max}) &= 3 \times 90 \times 2 = \mathbf{540 \, m^3 s^{-1}} \text{ (voir chap. 3)} \end{aligned}$$

L'intensité d'un lahar peut être dix fois supérieure à celle d'un *banjir*, lequel ne possède donc pas le même pouvoir destructeur. Le débordement de la rivière en cas de crue de type *banjir*, d'ailleurs, n'excède pas les limites du corridor de lahar. Un *banjir* incise le corridor, mais ne l'élargit pas, et ne menace donc pas les populations riveraines. Il existe donc des dynamiques d'intensités différentes qui ne renvoient pas du tout aux mêmes processus ni aux mêmes effets, mais qu'il faudrait clarifier pour aboutir à un système d'alerte plus performant. Systématiquement, lorsque l'alerte « banjir ! banjir ! » retentit, vient en réponse cette demande de précision : « banjir apa ? lokal atau banjir lahar ? » (quel type de banjir ? Une inondation locale ou bien un lahar ?), à cause d'une mauvaise délimitation conceptuelle des termes en jeu.

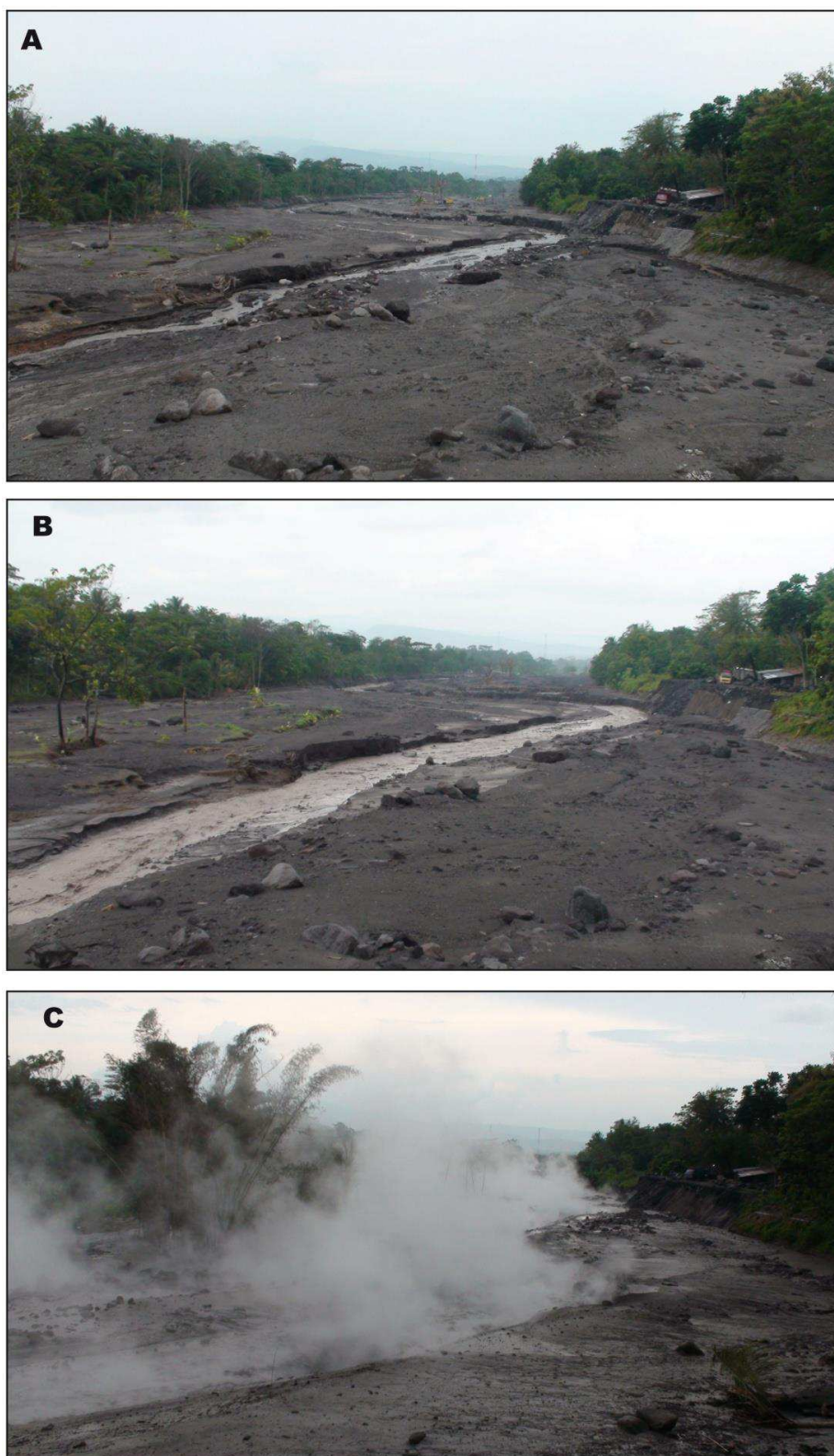


Figure 117 – La rivière Gendol, différences entre : A mode d'écoulement fluvial et lent de faible profondeur, incision des dépôts du large corridor de lahar. B : « banjir », écoulement torrentiel plus profond et rapide, augmentation du débit mais pas de débordement sur le corridor de lahar. C : lahar, écoulement non chenalisé sur l'ensemble du corridor, transport de matériel grossier (repérer les blocs à gauche de l'image et les débordements latéraux sur la rive droite du chenal). La haute température du lahar est indiquée par le panache de vapeur qu'il dégage.

Clichés E. de Bélizal, A et B : avril 2011, C : février 2011. Orientation vers l'aval (sud).

CONCLUSION

UNE SITUATION DE CRISE ET UN RISQUE DE CATASTROPHE

La seconde partie de la thèse a eu pour objectifs de montrer pourquoi et comment les corridors de lahars du Merapi peuvent être identifiés comme un espace de risque après l'éruption de 2010. Les lahars représentent bien un aléa majeur au Merapi, dont les impacts sont d'abord liés aux conséquences géomorphologiques sur le tracé des rivières. Le chapitre 4 montre que les populations les plus mal préparées se trouvent surtout sur le talus distal, correspondant aux principales zones où les lahars représentent un danger potentiel (Figure 56) et où les enjeux sont les plus forts. En dépit de dégâts de plusieurs millions d'euros, la situation n'est toutefois pas catastrophique si on la rapporte à l'autre exemple de lahars postéruptifs ayant suivi une éruption majeure (Pinatubo, 1991-1997). En termes d'intensité et de magnitude, les lahars du Merapi demeurent plutôt modestes comparés à ceux du Pinatubo, et les structures économiques, sociales et spatiales du volcan, si elles ont été ébranlées, n'ont pas été bouleversées dans leur ensemble, et ce grâce à une gestion pour l'instant efficace de la crise. Toutefois, à plus grande échelle, on constate d'importantes disparités entre les communes impactées : dégâts mineurs sur l'ensemble d'une commune (Bimomartani, sur la Opak), dégâts qui concernent un ou deux villages par commune (Argomulyo, Tamanagung, Sindumartani) ou dégâts qui concernent près des deux-tiers d'une commune, comme à Jumoyo mais surtout à Sirahan, où la situation dans ce cas s'apparente plus à une catastrophe locale (destructions importantes, population en situation précaire dans des centres d'accueils, exposition à des phénomènes de défluviations dangereuses). L'intérêt de la démarche d'analyse multiscalaire proposée tout au long de cette partie permet de mettre en évidence ces différents degrés d'impacts, et de hiérarchiser les zones sinistrées dans un contexte où les lahars atteignent une fréquence et une extension assez inhabituelle au Merapi. Il s'agit donc d'une situation de crise, dont l'évolution pendant les années à venir dépendra du rythme de remobilisation du stock pyroclastique mais aussi de la capacité des populations à continuer à faire face aux lahars comme en 2010-2011. Le cumul des impacts socioéconomiques peut conduire à un affaiblissement problématique des populations du Merapi (Figure 118) et augmenter leur vulnérabilité. Les lahars ont effectivement créé une crise qui peut grever le développement local, mais dont les impacts, s'ils perdurent plusieurs années encore, peuvent affaiblir les populations du Merapi à cause des perturbations qu'ils provoquent, formant une boucle de rétroaction susceptible d'augmenter le risque (Figure 118) : la catastrophe n'est donc pas à exclure.

Le questionnaire de connaissance des lahars présenté à l'ouverture du chapitre 4 montre que 56% répondants (soit 353 personnes) creusent les dépôts volcanoclastiques, surtout pour en récupérer les sables grossiers (chap. 5). L'exploitation de la ressource que représente le matériel laissé par les lahars implique *de facto* l'exposition directe de travailleurs aux coulées de débris et aux écoulements hyperconcentrés dont on a vu les dangers qu'ils représentent. Les sites d'extraction sont ainsi également des zones à risque, mais qui n'apparaissent sur aucune carte. Pour mieux comprendre les lahars et mieux en spatialiser le risque, il convient de prendre en compte ces espaces : de les recenser, de les définir et d'en étudier le fonctionnement. Ils sont les exemples typiques de cette géographie complexe des milieux volcaniques, où les aménités naturelles qui fixent les populations demeurent intrinsèquement liées aux aléas. Pour pleinement saisir l'ensemble des facteurs du risque et pour prolonger l'analyse des corridors de lahars comme espace du risque, on ne peut faire l'impasse sur la ressource minérale que représentent les dépôts de lahars. Qu'est-ce qu'un site d'extraction ? Qui sont ces travailleurs ? Une telle activité permet-elle de réduire la vulnérabilité des populations du Merapi, en leur apportant de quoi faire face financièrement aux aléas, et d'ainsi limiter leurs impacts ? Ces questions seront investiguées tout au long de la prochaine partie de cette thèse, pour une vision systémique du complexe aléa-ressource-risque qu'illustrent les lahars du Merapi.

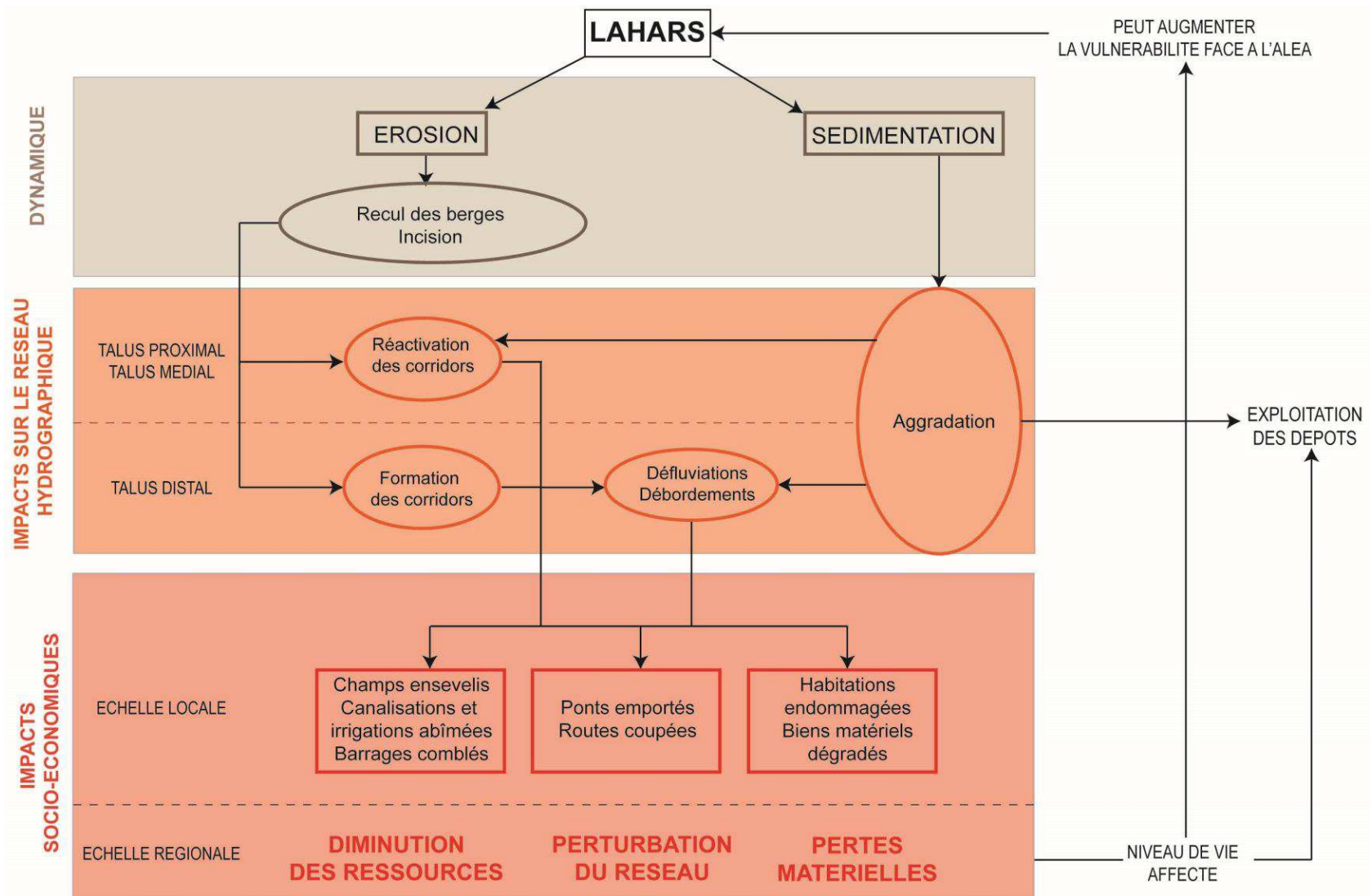


Figure 118 – Les impacts des lahars – aperçu synthétique

TROISIÈME PARTIE

Les lahars comme vecteurs de ressource : quand l'aléa devient un moyen de subsistance



Plumbon, corridor de lahars de la Gendol : un site d'extraction très fréquenté en juin 2011

Chapitre 6 – Évolution et enjeux des sites d'extraction dans les vallées du Merapi avant l'éruption de 2010

« Les flancs ouest du Merapi ressemblent à une mer de sable »
Suara Merdeka, 14 octobre 1994

L'extraction des sables ou des blocs dans les dépôts volcanoclastiques, parfois les dépôts pyroclastiques, est une activité traditionnelle qui, depuis la fin des années 1980, n'a cessé de gagner en importance. Le nombre de travailleurs a augmenté, aboutissant à une multiplication des sites d'extraction dans les vallées radiales du Merapi dans les années 1990. Les rythmes de creusement se sont donc intensifiés, et se sont traduits par une très nette croissance du volume de matériel extrait jusqu'au milieu des années 2000. Par corollaire, les camions ont été de plus en plus nombreux à transporter travailleurs et chargements sur les routes du Merapi, depuis les grandes voies d'accès jusqu'aux chemins étroits, rendant parfois la circulation dangereuse, en tout cas difficile, et contribuant à une très rapide dégradation des infrastructures routières. Pour suivre l'évolution très rapide de cette activité mobilisant toujours plus de personnes et de moyens, les gouvernements locaux des quatre districts du Merapi ont tenté d'élaborer un encadrement juridique cohérent, qui n'a pas échappé aux lenteurs administratives et à la corruption.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un panorama de l'évolution générale des extractions autour du Merapi, en montrant notamment comment cette activité, bien qu'informelle, est devenue primordiale dans la géographie du volcan. Il s'agit d'un essai de synthèse diachronique globale de l'ensemble des évolutions de l'activité d'extraction au Merapi, travail qui n'a encore jamais été entrepris jusqu'alors. Les observations et enquêtes de terrains ont été complétées par la lecture de nombreux rapports et mémoires universitaires, afin de proposer un historique le plus complet possible des aspects généraux de cette activité.

La première rubrique, qui présente l'organisation générale du fonctionnement des extractions, s'appuie sur des observations de terrain menées de 2008 à 2011 ainsi que sur les images aériennes acquises lors d'une campagne de photographies par ULM en septembre 2010. Les résultats du second sous-chapitre sont tirés des enquêtes de terrain de 2008 et d'un questionnaire réalisé en 2009 dans la Gendol (De Bélizal *et al.*, 2011). Des chiffres communiqués par les institutions locales ou par des mémoires universitaires ont permis d'effectuer des calculs de tonnages de matériel transporté - avec toute la réserve qu'implique l'utilisation de données secondaires d'une fiabilité parfois discutable (voir chap. 2). Enfin, des coupures de presse représentant une durée de plus de vingt ans ont été utilisées pour caler la chronologie et bien caractériser les grandes étapes de l'organisation, chaotique et complexe, des extractions dans les vallées et corridors de lahars du Merapi.

I. L'organisation générale d'un site d'extraction

L'existence des sites d'extraction dans les vallées du Merapi est conditionnée par deux critères : le renouvellement de la ressource (selon la fréquence d'occurrence des écoulements volcanoclastiques) et l'accessibilité au corridor de lahar, surtout lorsque les dépôts n'excédaient pas le talus médial du volcan, au fond de vallées parfois fortement encaissées avant l'éruption de 2010 et l'étalement du matériel volcanoclastique jusque sur le talus distal. Il faut limiter le plus possible les délais liés aux manœuvres d'entrées et de sorties, et éviter les accidents de circulation puisque les camions jouent un rôle prédominant dans l'activité, le transport du matériel exploité se faisant exclusivement par voie routière.

1. Matériel extrait et principes de vente

1.1 Fractions choisies, fractions délaissées et *banthak*

Les carrières sont installées dans les dépôts de sables et de blocs formant les corridors de lahars (Figure 119). Parmi la gamme granulométrique des dépôts volcanoclastiques, les fractions fines et les blocs sont privilégiés. Les sables – de préférence grossiers – sont directement incorporés aux mélanges de production de béton, tandis que les blocs sont vendus aux nombreux ateliers de sculpture localisés principalement sur le versant occidental du Merapi (De Bélizal *et al.*, 2011). La sélection des matériaux extraits se fait dans la carrière même. Dans le cas où les travailleurs recherchent du sable, qui est d'autant plus prisé qu'il est grossier, chaque pelletée est passée au tamis afin d'en ôter les graviers ou cailloux qui y seraient présents. Le très mauvais tri et le classement quasi-inexistant dans les dépôts volcanoclastiques complexifie cette recherche de matériel homogène. Dans le cas des blocs, il est nécessaire de les briser pour pouvoir les transporter. L'opération est délicate, car il s'agit d'andésite, une roche volcanique dense et cohérente. Le bloc est au préalable inspecté afin d'en détecter d'éventuelles fissures, puis des clous et des rivets lui sont incorporés à travers ces lignes de



Figure 119 – Site d'extraction à Jambu-Kaliadem. Les dépôts de lahars recouvrent la totalité du fond de vallée.
(cliché E. de Bélizal, juin 2010)

fractures afin de le faire éclater.

Les fractions intermédiaires des dépôts volcanoclastiques, constituées de graviers ou de cailloux de petite taille (≤ 8 cm), sont rarement choisies, car elles nécessitent une pulvérisation industrielle pour être utilisées ensuite comme des sables. Ainsi, alors que les sables et les blocs disparaissent par ponction anthropique, les cailloux eux subsistent sous la forme de terrils nommés des *banthak*, visibles dans n'importe quel site d'extraction (Figure 120). Dans le cas des

carrières très fortement exploitées, où tout le sable fin a déjà été emporté, les fonds de vallée apparaissent entièrement occupés par ces amas de cailloux et de graviers.



Figure 120 – Banthak (taille : 1,5 m) dans le site d'extraction de Manggong, Gendol
(cliché E. de Bélizal, août 2008)

1.2 Les magasins de stockage (*depo pasir*) : fonctionnement et répartition

Une fois que le camion est rempli, pendant que son équipe se repose au *warung* (restaurant et échoppe situé souvent à l'entrée du site), le chauffeur emporte sa cargaison vers un lieu de vente nommé *depo pasir* (magasin de stockage, lieu de revente) qui achète le sable en gros. Le chargement est ensuite revendu à des acheteurs particuliers, essentiellement locaux, ou bien à des entreprises de bâtiment en provenance de toute l'île de Java. D'après les enquêtes de terrain menées en 2009 (Pak Bejo et Pak Suparman, entretiens), il existe deux types de *depo pasir*, en fonction de leur surface et de leur matériel.

1.2.1 Le depo pasir industriel

Ce type de magasin de stockage occupe une surface importante ($\geq 100 \text{ m}^2$), sur laquelle de très grands volumes de sable sont conservés. Situés sur de grands axes routiers, notamment sur la quatre-voies qui relie Yogyakarta à Semarang, au niveau de la ville de Muntilan. Au début des années 2000, le sable du Merapi était parfois dénommé « sable de Muntilan » (Pak Bejo, entretien, 2009). Ces sites de revente reçoivent du sable ou des blocs de l'ensemble des vallées du Merapi, et peuvent accueillir plusieurs camions à la fois. Ceux-ci sont pesés avec précision. Le déchargement de la marchandise est rapide, généralement effectué par une pelleteuse. Leur approvisionnement est régulier, tout comme leur clientèle, qui vient parfois de loin (Semarang, Solo...) pour acheter les pondéreux au m^3 . Ils possèdent un bâtiment en dur dans lequel sont hébergés quelques petits bureaux, mais n'ont pas de hangar : la marchandise est stockée en plein air, protégée parfois par une bâche tendue sur des tréteaux de bambou. Ils peuvent décharger la marchandise de plusieurs dizaines de camions par jour.

1.2.2 Le depo pasir de proximité

Le *depo pasir* de proximité n'est pas situé sur les axes de communication stratégiques, mais se trouve au plus près des sites d'extraction. Avant l'éruption de 2010, on les trouvait amassés le long de la route longeant l'est de la Gendol. La totalité de leur marchandise provient des carrières les plus proches (Pak Suparman, entretien, 2009). Ils sont généralement de taille réduite ($\leq 100 \text{ m}^2$) et ont une

clientèle locale, tant pour la vente que pour l'achat des pondéreux. La plupart du temps, ils ne bénéficient pas de bureaux ni d'engins mécaniques pour décharger les camions, ce qui impose des longs délais d'attente au chauffeur, équivalents au temps nécessaire pour décharger un camion (entre 2 et 3 heures). De fait, ces *depo pasir* ont une clientèle limitée, puisqu'ils ne peuvent accueillir que quatre à cinq camions par jour. Ce sont ces délais qui permettent à plusieurs *depo pasir* de se développer sur un même espace : pendant qu'un camion est déchargé dans l'un, les camions suivants peuvent aller vendre leur marchandise chez les autres, situés juste à côté. En règle générale, ils achètent les blocs ou le sable à des prix très similaires à ceux pratiqués par les *depo pasir* plus vastes (cf. infra, III.1).

Que le chauffeur vende sa marchandise dans un type de *depo pasir* plutôt qu'un autre n'a, au bout du compte, que peu de différences. Aller dans un *depo pasir* industriel nécessite de faire une route assez longue, pour rejoindre les grands axes de communication, ce qui peut partiellement compenser les délais subis dans les *depo pasir* de petite taille. Par ailleurs, certaines équipes résident à proximité des carrières : elles peuvent arriver plus tôt, rester plus tard le soir, et ainsi faire plusieurs aller-retour vers des *depo pasir* locaux (pour éviter des frais d'essence). En revanche, d'autres équipes viennent de loin, parfois même de très loin, et n'ont pas le temps de faire plus d'un chargement dans les vallées du Merapi. En ce cas, ils vendent leur cargaison sur les *depo pasir* industriels, qu'ils croiseront forcément sur les grands axes routiers, voire dans les grandes agglomérations javanaises proches du Merapi (Yogyakarta, Magelang), ou plus lointaines (Solo, Semarang, Jepara). Dans ce dernier cas, le prix de vente est généralement le double de celui des *depo pasir* industriels ou de proximité que l'on trouve au Merapi (cf. infra, III.1).

2. Les modes de travail

2.1 Extractions manuelles et mécaniques



Figure 121 - Extraction mécanique des dépôts, versant oriental de la Woro (cliché E. de Bélizal, mai 2010)

Les carrières fonctionnent selon deux modes principaux : les extractions mécaniques à l'aide d'excavateurs et de pelleteuses, et les extractions manuelles à l'aide de pioches, de piques et de pelles. La législation a interdit l'usage des pelleteuses au début des années 2000, étant donné les dégradations environnementales drastiques provoquées par les déplacements rapides de très grands volumes de matériel. Avant l'éruption de 2010, les engins mécaniques avaient presque entièrement disparu des carrières du Merapi, à l'exception de quelques sites d'extraction dans la Woro (Figure

121). Des systèmes d'extraction par pompage dans les rivières et non plus uniquement dans les dépôts qui recouvrent les corridors de lahars ont été signalés après l'éruption de 2010.

L'extraction manuelle est le mode de travail traditionnel, quasi-ancestral, désigné par le terme javanais *slenggrong*, exécuté par un(e) *penyelenggrong* (Supangkat, 1988). Certains travailleurs

escaladent les levées formées par les dépôts pour les débiter à la pique, faisant tomber les blocs et les matières fines (Figure 122). Dans d'autres cas, lorsque les dépôts recouvrent le fond de vallée de manière uniforme, ceux-ci sont piochés directement et sont rapidement constellés de trous de taille variable (Figure 123).



Figure 122 -Extraction manuelle des dépôts à Jambu-Kaliadem, Gendol
(cliché E. de Bélizal, avril 2010)



Figure 123 - Une carrière dans le site d'extraction de Jambu-Kaliadem, Gendol. Le trou est profond de 1,8 m pour un diamètre de 3 m (cliché E. de Bélizal, août 2009). Le sable grossier qui sera vendu est amassé en tas avant d'être chargé, visible ici au premier plan de l'image, devant les travailleurs.

2.2 Le transport du matériel

La quasi-totalité des blocs et sables extraits sont transportés en-dehors des vallées par des camions de taille variable. Sudibyo (2002) mentionne quatre principaux types de véhicules : les Colt Diesel (4 m³), les petits Fuso (6-8 m³), les Fuso (13 m³), et les camions-bennes (18 m³ jusqu'à 25 m³). Ces différentes catégories semblent avoir été assez également utilisées dans l'ouest du Merapi depuis les années 1990. Toutefois, à la fin des années 2000, les observations de terrain ont montré que la variété s'est réduite à de petits Colt Diesel de 4 m³ beaucoup plus maniables que les plus gros poids lourds, ces derniers n'ayant en outre jamais été signalés au sud du Merapi. Les véhicules sont souvent décorés de graffitis humoristiques (*gagal sarjana* : examen raté, *bibir liar* : lèvres sauvages), de noms culturels javanais (*wijaya kusuma*) plus rarement aux couleurs des entreprises le cas échéant. Celles-ci

possèdent généralement une dizaine de camions (CV Material Prima, Lestari – Pak Anton, entretien, 2009), voire une centaine (PT Puma Sakti). Le camion et le chauffeur sont au cœur de l'activité. Le camion transporte le matériel extrait vers les sites de revente. Le chauffeur, ensuite, répartit l'argent gagné entre les membres de l'équipe qui a rempli le camion.

Dans le cas d'extraction à usage privé, le matériel est transporté à moto, dans des sacs de petit format. Cette pratique, qui n'est pas relatée dans les études universitaires ou les rapports, n'a été observée que sur les sites d'extraction mineurs (Argomulyo sur l'aval de la Gendol ; Turgo en amont de la Boyong, Senowo) avant l'éruption de 2010. Elle n'était que très marginale.

3. Les éléments structurants des sites d'extraction

3.1 Accéder aux sites d'extraction : les voies d'accès

Les études de terrain effectuées de 2008 à 2011 ont permis de distinguer trois types principaux de voies d'accès, déterminées en fonction de l'existence d'aménagement d'infrastructures spécifiques pour la circulation des camions, ainsi que de l'entretien et de la qualité de la route.

3.1.1 *Des aménagements spécifiques pour la desserte des sites d'extraction*

Sur les talus proximal et médial du volcan des voies spéciales ont été aménagées pour permettre aux poids lourds de rejoindre les sites d'extraction situés dans les fonds de vallée encaissés à plus de 30 m. Sur les plus grands sites (Putih, Gendol), des péages étaient installés pour la perception de taxes communales et régionales.

À Jurangjero, dans la Putih, qui fut l'un des sites d'extraction majeurs du milieu des années 1990 jusqu'au milieu des années 2000, une route pavée large de 12 m fut bâtie sur un terre-plein longeant la ligne du mur de consolidation de berge. Entre les deux sabo-dams, la route se dédouble en deux voies permettant de faciliter les flux d'entrées et de sorties (Figure 124). Au début des années 2000, plusieurs centaines de camions venaient sur ce site (Sudibyo, 2002). On remarque une organisation un peu différente pour le site de Jambu-Kaliadem. Le fond de vallée, encaissé à 40 m, est desservi par deux routes situées de part et d'autre de la vallée au niveau du barrage de Kopeng, et reliées ensuite au réseau communal, puis régional.

3.1.2 *Des carrières situées à proximité des routes*

Dans le cas de sites d'extraction où le matériel volcanoclastique est de qualité médiocre et/ou peu abondant, généralement dans les parties aval des rivières avant l'éruption de 2010, il n'existe pas d'infrastructures routières spécifiquement aménagées. Au contraire, les extractions ont plutôt tendance à se développer là où existent déjà des conditions d'accès favorables : présence de ponts ou de sabo-dam, notamment, à partir desquels il est possible de rejoindre la rivière. À quelques centaines de mètres en aval de Jambu-Kaliadem, deux sabo-dams ont été construits suite à l'éruption de 2006, et ont été les noyaux autour desquels s'est cristallisée l'activité d'extraction du site de Manggong. En effet, c'est grâce à ces aménagements que l'extraction a pu s'y développer, bénéficiant des facilités d'accès prévues initialement pour l'entretien des barrages. Enfin, en aval de Manggong, à Argomulyo, où avant l'éruption de 2010 une petite activité d'extraction existait (moins de 10 camions par jour), l'accès au site se faisait par les ponts, desquels partaient des chemins non goudronnés vers le fond de vallée, grâce à un encaissement très faible. La même organisation se retrouvait dans les sites de l'ouest du Merapi, dans la Bebeng, la Blongkeng, la Lamat ou la Pabelan.

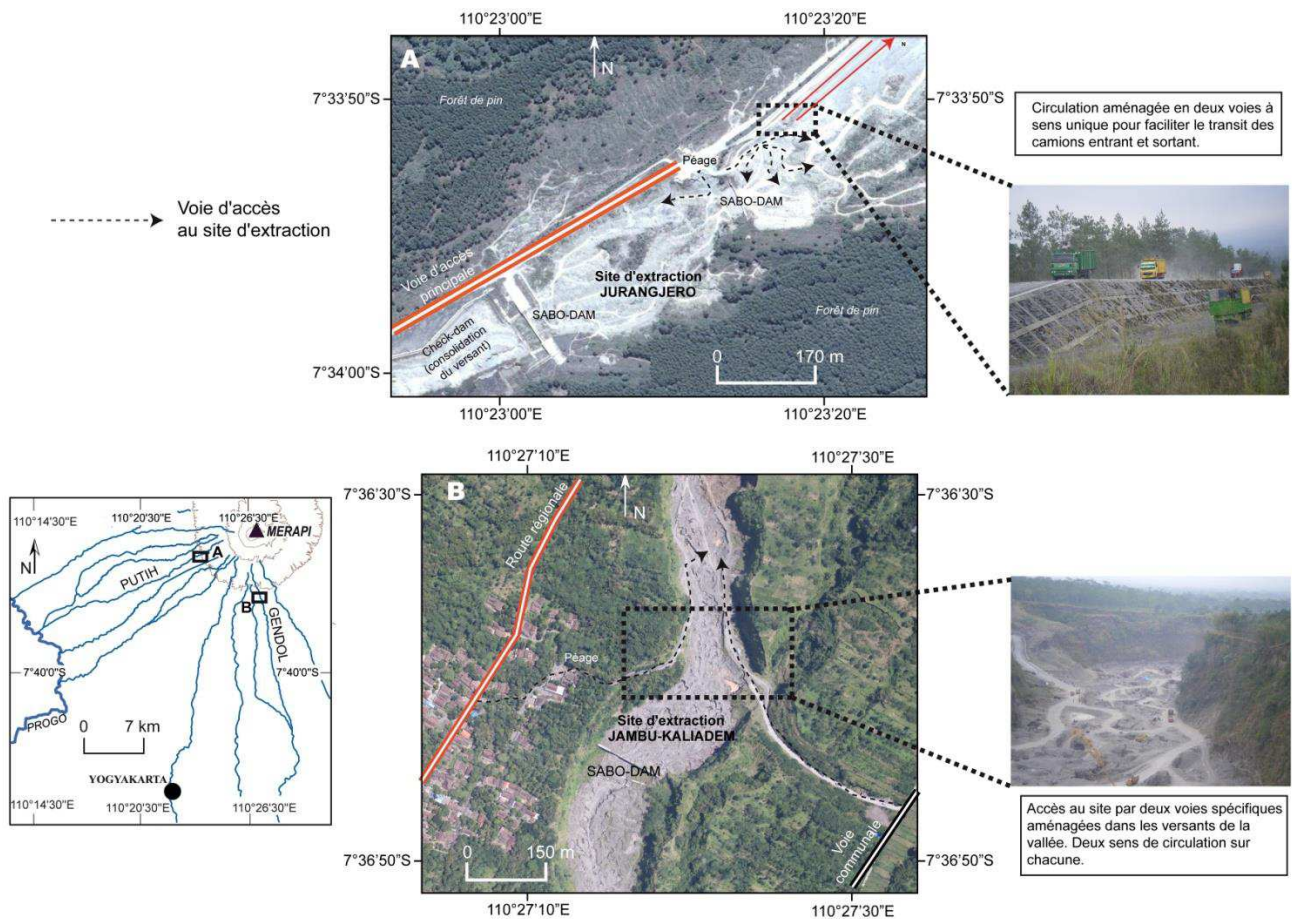


Figure 124 - Comparaison de l'organisation des voies d'accès: site de Jurangjero (Putih) et Jambu-Kaliadem (Gendol). A : image Quickbird 2006 ; B : mission ULM septembre 2010.

Photos au sol : clichés E. de Bélizal (août 2008).

3.1.3 Des voies d'accès nécessaires mais dégradées

Certains sites ne bénéficient pas d'une voirie de qualité pour permettre une circulation aisée et sécurisée des camions. Il s'agit de carrières éloignées des axes de circulation structurants, et peu à peu délaissées pour des sites situés dans des secteurs mieux desservis par le réseau routier. Ce cas est particulièrement bien représenté sur la Senowo, où le chemin d'accès au principal site d'extraction situé dans la partie amont à Mangunsuko a été considérablement endommagé par le passage successif des camions. Ceux-ci ont provoqué des éboulements ponctuels, qui n'ont jamais été réparés compte tenu d'une fréquentation en baisse. Pour les personnes qui continuaient à y venir avant l'éruption de 2010, l'accès était particulièrement malaisé et dangereux. Le même cas de figure s'observe à Turgo, tout en amont de la Boyong. Alors que les parties plus en aval (Kemiricilik et Kemiri) revenaient progressivement à l'agriculture dans les années 2000, le site de Turgo continuait à être sporadiquement traversé par des lahars. L'activité d'extraction s'y maintenait modestement, avec une douzaine de camions par jour, provenant exclusivement des alentours. Tout comme pour la Senowo, le site de Turgo est situé à proximité d'un village isolé et souffre d'un certain éloignement des principaux axes de communication. La voie d'accès au site n'est plus goudronnée, et lorsque les camions pouvaient encore l'emprunter avant l'éruption de 2010, il fallait compter 5 bonnes minutes pour grimper les deux lacets qu'elle forme, et exigeait de la part du chauffeur une certaine maîtrise du moteur.

3.2 Dans les sites d'extraction : chemins, carrières et *warung*

Les différents types de voies d'accès mènent au corridor de lahars où s'opère l'interconnexion avec les chemins non goudronnés qui parcourent le site d'extraction. Ces chemins, parfois doublés de sentiers secondaires, permettent aux camions de se garer au plus près des carrières, qui sont aléatoirement répartis sur l'ensemble du fond de vallée. La circulation y est souvent laborieuse du fait de la mauvaise qualité des sentiers empruntés. Les véhicules roulent à vitesse réduite, surtout en cas de forte affluence. À proximité de l'entrée ou de la sortie du site est souvent situé un *warung*, restaurant/magasin traditionnel bâti de bambou, où viennent se restaurer les travailleurs pendant leurs pauses (Figure 125). C'est un lieu essentiel de socialisation et de discussion (De Bélizal *et al.*, 2011). Sa situation stratégique, généralement bien en vue des voies d'accès, en fait un lieu d'observation privilégié de l'organisation spatiale des sites d'extraction. Devant ce *warung* se trouve parfois le responsable chargé de récupérer la taxe de péage (Figure 125A).

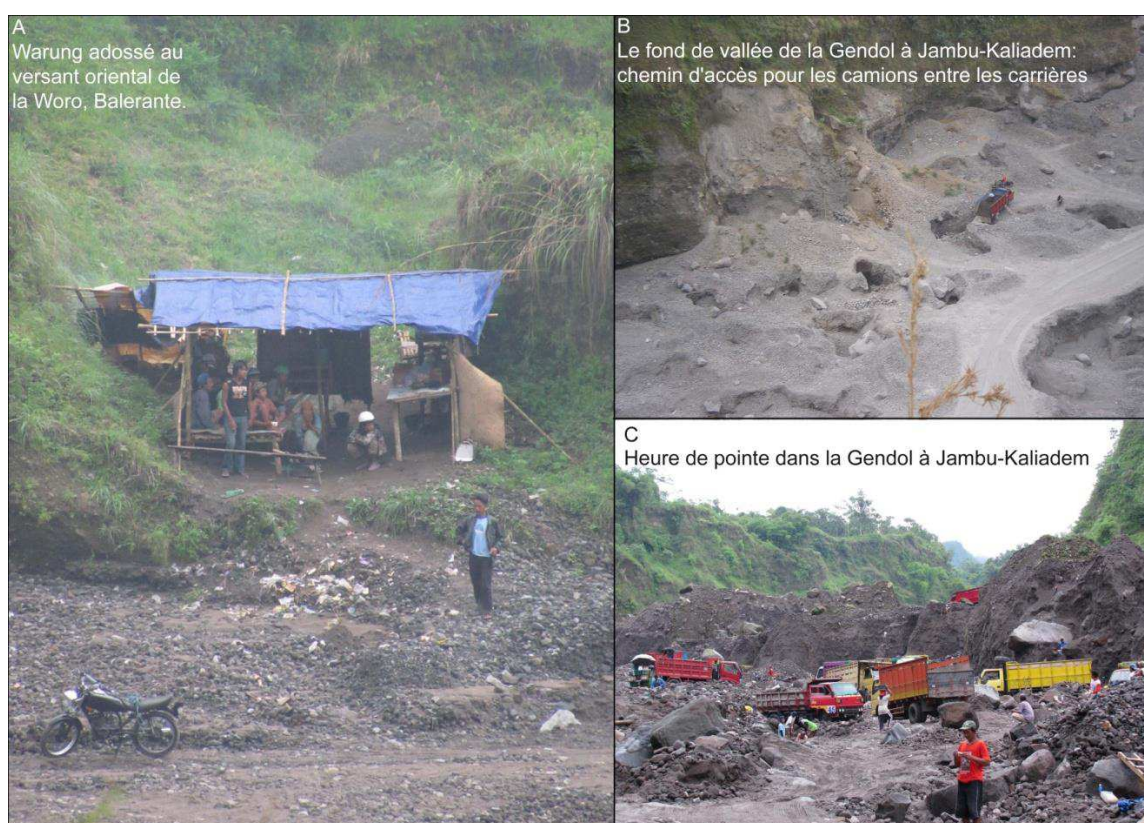


Figure 125 - Quelques vues des extractions dans les vallées du Merapi
(clichés E. de Bélizal, A : mai 2010 ; B : août 2008 ; C : avril 2010).

L'organisation générale des sites d'extractions est simple, faiblement mécanisée, et repose presque entièrement sur les camions, qui sont les principaux vecteurs de la marchandise depuis le Merapi vers les lieux de revente locaux ou plus lointains. Toutefois, les creusements, la sélection du matériel et l'édification de terrils, le passage répété des camions, le sapement des bas de versants marquent la topographie des dépôts ainsi exploités (Figure 126).

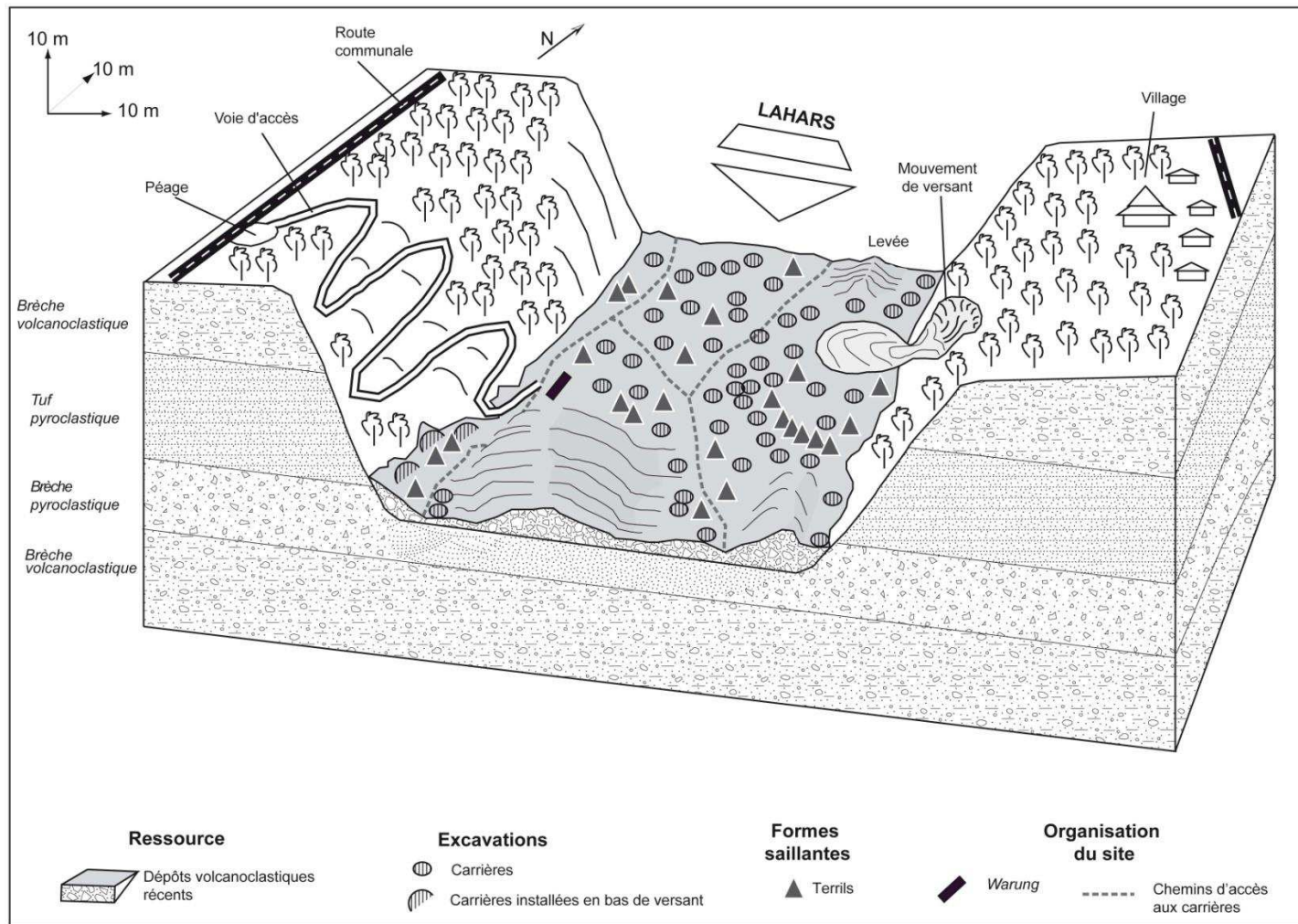


Figure 126 – Organisation théorique d'un site d'extraction et géomorphologie associée. L'exploitation des dépôts amène la formation de microformes de relief s'ajoutant à la topographie naturellement ondulée en levées et en chenaux temporaires du fond de vallée : petites dépressions (excavations des carrières), petites formes saillantes (banthak, ou terrils), chemins de circulation des véhicules (qui contribuent à fixer les chenaux en tassant localement les dépôts). Les creusements au pied des versant contribuent au déclenchement d'éboulements ou de glissements des dépôts anciens (indurés en brèches et en tufs) qui composent les talus proximal et médial de l'édifice.

II. Une ressource inégalement répartie (des années 1990 à 2010)

La répartition des volumes extraits dans les vallées autour du Merapi (Figure 127) montre que les rythmes de l'activité varient très rapidement, et ce en fonction du nombre de coulées volcanoclastiques qui apportent du matériel. À l'abondance du nombre de sites d'extraction et des volumes extraits dans l'ouest du Merapi au début des années 2000, suit une période de déclin. En revanche, les sites de la Gendol, où se sont produites les coulées pyroclastiques en 2006, suivies par des lahars jusqu'en 2009, deviennent de plus en plus fréquentés.

1. Variation spatio-temporelle des volumes extraits au cours des années 2000

L'évaluation des quantités annuelles de matériaux extraits dans les vallées (indifféremment des particules fines ou des blocs) a été établie d'après des données secondaires préexistantes ou calculée d'après le nombre de camions comptés sur l'ensemble des sites d'extraction d'une vallée. Dans ce dernier cas, la fréquentation annuelle des vallées a été estimée directement sur le terrain de 2008 à 2010, tandis que les données antérieures ont dû être reconstituées d'après des rapports ou des mémoires universitaires. Les données secondaires, dans un cas comme dans l'autre, n'ont pas permis de reconstituer les volumes extraits dans les années 1980 et les années 1990, et plusieurs lacunes n'ont pu être comblées concernant le passage de camions au milieu des années 2000. Les rapports n'identifient pas (excepté à Sleman) les volumes respectifs de sables et de blocs qui sont extraits : les volumes correspondent donc à l'exploitation totale des sables et des blocs ensemble.

1.1 Calcul des volumes d'après la fréquentation des camions par vallée : rappel méthodologique

Les volumes de matériaux extraits autour du Merapi ont pu être reconstitués sur l'ensemble de la décennie 2000 à l'aide des estimations du nombre de camions fréquentant chaque jour les sites d'extraction, présents dans des rapports ou des mémoires universitaires (cf. chap. 2). Pour calculer les volumes, la capacité maximale des camions, lorsqu'elle était connue, a été prise en compte. Dans le cas où cette donnée n'était pas spécifiée, il a été décidé de considérer la capacité des Colt Diesel (4 m³) comme valeur par défaut, puisqu'il s'agit du type de véhicule le plus communément utilisé, surtout à la fin de la période considérée. Ces données ont permis de calculer un volume total de matières extraites par jour, extrapolé ensuite à l'année entière en le multipliant par 350 (cf. chap. 2).

1.2 Une ressource variable dans l'espace et le temps

1.2.1 *Évolution de la répartition des sites d'extraction*

Les différents résultats (Tableau 30, Tableau 31) montrent une légère augmentation du nombre de véhicules circulant tous les jours vers les sites d'extraction du Merapi entre le début des années 2000 (1316 camions par jour) et 2010 (1496 camions par jour). Cela est dû, vraisemblablement, à une augmentation du nombre de travailleurs, qu'il est impossible de prouver compte tenu de l'absence de comptage (une faible partie était déclarée dans les années 2000, voir infra III, 2, 2.2). Toutefois, si l'on

Tableau 30 - Reconstitution des volumes extraits par jour

Rivières	Début années 2000						Milieu des années 2000						Fin des années 2000					
	Nombre de camions par jour					Volume m ³ par jour	Nombre de camions par jour					Volume m ³ par jour	Nombre de camions par jour					Volume m ³ par jour
	Colt Diesel 4m ³	Fuso 8 m ³	Fuso 13 m ³	Camion-benne 18 m ³	TOTAL		Colt Diesel 4m ³	Fuso 8 m ³	Fuso 13 m ³	Camion-benne 18 m ³	TOTAL		Colt Diesel 4m ³	Fuso 8 m ³	Fuso 13 m ³	Camion-benne 18 m ³	TOTAL	
Apu	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	280	0	0	0	280	1120
Trising	15	0	0	0	15	60	?	?	?	?		?	0	0	0	0	0	0
Senowo	26	0	0	0	26	104	?	?	?	?		?	24	0	0	0	24	96
Pabelan	47	0	0	0	47	188	?	?	?	?		?	0	0	0	0	0	0
Lamat	35	0	0	0	35	140	?	?	?	?		?	0	0	0	0	0	0
Blongkeng	187	0	0	0	187	748	?	?	?	?		?	0	0	0	0	0	0
Putih	270	217	0	209	696	6578	448	90	215	210	963	9087	58	12	0	0	70	328
Batang	2	0	0	126	128	2276	?	?	?	?		?	0	0	0	0	0	0
Bebeng	37	5	140	?	182	2008	?	?	?	?		?	75	0	0	0	75	300
Krasak	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	0	0	0	0	0	0
Boyong	138	?	?	?	?	?	82	0	0	0	82	328	12	0	0	0	12	48
Kuning	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	0	0	0	0	0	0
Opak	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	65	0	0	0	65	260
Gendol	46	?	?	?	?	?	150	0	0	0	27	600	1040	0	0	0	1040	4160
Woro	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	210	0	0	0	210	840
TOTAL	803	222	140	335	1316	12102	557	90	215	210	1072	9523	1484	12	0	0	1496	6032

Tableau 31 - Reconstitution des volumes extraits par an

Rivière	Début années 2000						Milieu des années 2000						Fin des années 2000					
	Nombre de camions par an					Volume m ³ par an	Nombre de camions par an					Volume m ³ par an	Nombre de camions par an					Volume m ³ par an
	Colt Diesel 4m ³	Fuso 8 m ³	Fuso 13 m ³	Camion-benne 18 m ³	TOTAL		Colt Diesel 4m ³	Fuso 8 m ³	Fuso 13 m ³	Camion-benne 18 m ³	TOTAL		Colt Diesel 4m ³	Fuso 8 m ³	Fuso 13 m ³	Camion-benne 20m ³	TOTAL	
Apu	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	98000	0	0	0	98000	392000
Trising	5250	0	0	0	5250	21000	?	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0
Senowo	9100	0	0	0	9100	36400	?	?	?	?	?	?	8400	0	0	0	8400	33600
Pabelan	16450	0	0	0	16450	65800	?	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0
Lamat	12250	0	0	0	12250	49000	?	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0
Blongkeng	65450	0	0	0	65450	261800	?	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0
Putih	94500	75950	0	73150	243600	2302300	156800	31500	75250	73500	337050	3180450	20300	4200	0	0	24500	114800
Batang	700	0	0	44100	44800	796600	?	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0
Bebeng	12950	1750	49000	?	63700	702800	?	?	?	?	?	?	26250	0	0	0	26250	105000
Krasak	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0
Boyong	48300	0	0	0	48300	193200	28700	0	0	0	28700	114800	4200	0	0	0	4200	16800
Kuning	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0
Opak	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	22750	0	0	0	22750	91000
Gendol	16100	0	0	0	16100	64400	52500	0	0	0	52500	210000	364000	0	0	0	364000	1456000
Woro	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	73500	0	0	0	73500	294000
TOTAL	281050	77700	49000	117250	525000	4493300	194950	31500	75250	73500	375200	3333050	519400	4200	0	0	523600	2111200

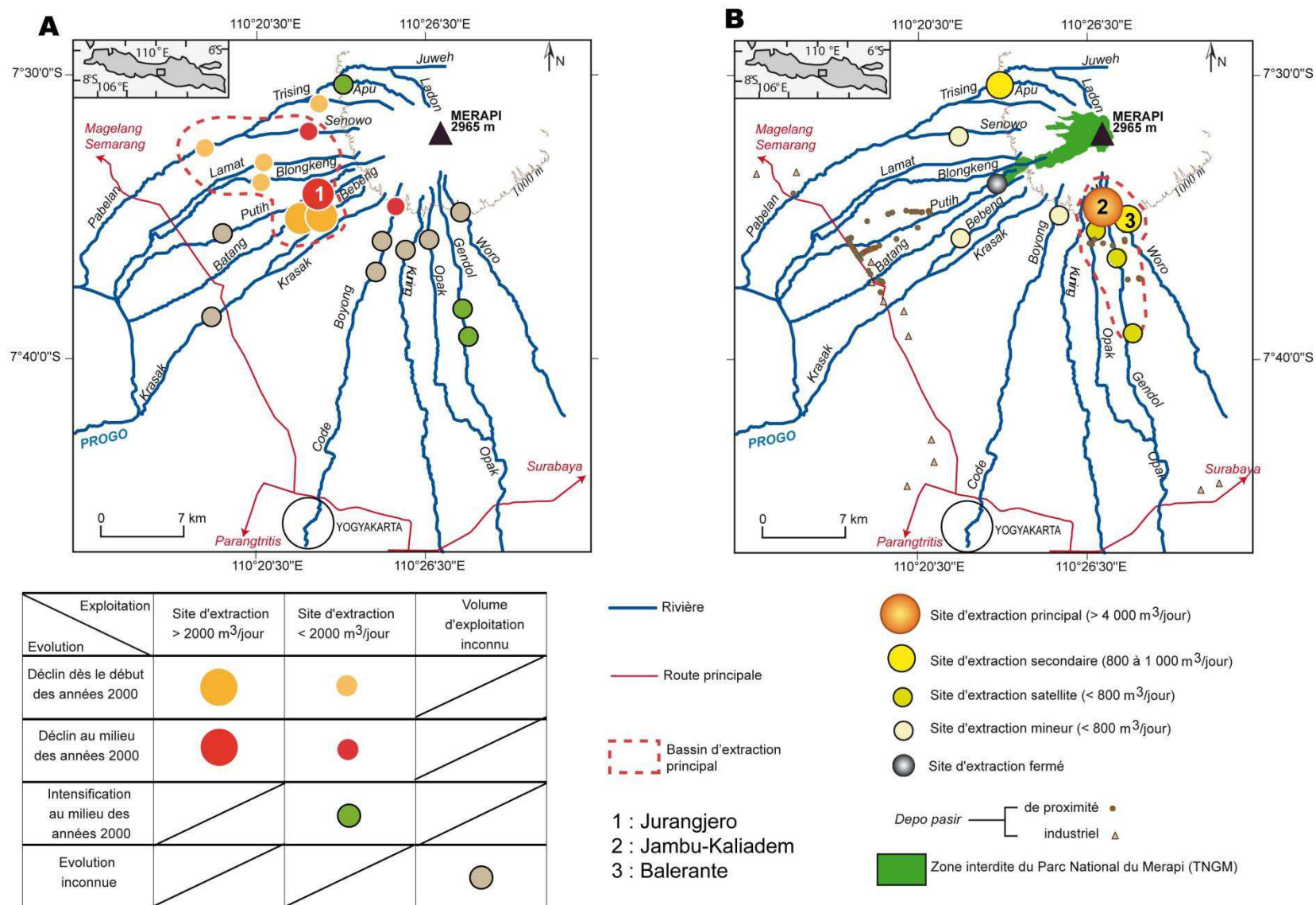


Figure 127 - Les sites d'extraction autour du Merapi: organisation générale et évolution. A : années 1990-2006 ; B : de 2006 à 2010.

considère que 3 à 4 personnes travaillent par camion, on passe d'environ 4600 à 5200 travailleurs durant cette décennie.

En revanche, cette augmentation de la fréquentation de camions n'est pas synonyme d'une intensification des volumes extraits dans les vallées autour du volcan, qui passent de $4,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ au début des années 2000 à $2,1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ en 2010. Une telle évolution peut s'expliquer d'abord par l'arrêt progressif des extractions mécaniques (à l'aide d'excavateurs et de pelleteuses), et ensuite par le tarissement de l'ensemble des sites du flanc ouest du volcan après 2004. Les sites de l'ouest du Merapi (rivières Pabelan, Lamat, Blongkeng, Trising) s'épuisent dès le milieu de la décennie tandis que l'activité se poursuit tant bien que mal dans la Putih et la Bebeng jusqu'aux années 2008-2010, avec toutefois une réduction des volumes extraits (divisés par 20 dans le cas de la Putih). Certaines carrières se développent même dans des vallées plus lointaines, comme la Apu, au Nord-ouest du massif dès la fin des années 2000. En 2006, les coulées pyroclastiques ont atteint la Gendol, au sud-est du Merapi, et ont renouvelé la ressource en matériel volcanique dans des sites modestes qui tendaient à s'essouffler au milieu de la décennie ($64\,400$ à $37\,800 \text{ m}^3$ de matériel extrait par an dans la Gendol entre le début et le milieu des années 2000). Suite à l'éruption, le cœur dynamique des extractions, auparavant situé à l'ouest du Merapi, se déplace dans la Gendol, qui devient le nouveau pôle de l'activité, d'où partent les principaux flux de vente (Figure 127). À la fin de la décennie, on estime à $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ le volume de matériel extrait dans la Gendol, soit 70% du total annuel autour du Merapi, les autres sites étant en déclin prononcé, voire reconvertis vers l'agriculture (Boyong, Blongkeng, Lamat, Pabelan, aval de la Senowo...). Sur l'ensemble de la période, c'est dans la Putih qu'ont été évalués les rythmes d'extraction les plus intenses, autour de $3,2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ au milieu des années 2000.

1.2.2 Durée théorique d'exploitation des sites d'extraction

À partir de ces estimations de volumes, combien de temps un site d'extraction peut-il être exploité ? Si les lahars sont fréquents, le renouvellement en sables et en blocs volcanoclastiques est assuré. Toutefois, dès que le stock pyroclastique s'épuise et que le transfert sédimentaire ne peut plus s'effectuer, les sites d'extraction ne sont plus approvisionnés. À la double dynamique d'incision et de sédimentation des lahars succède l'érosion « anthropique » des extractions comme principal agent morphogène : il est dès lors possible d'évaluer la durée de vie des sites d'extraction, nécessaire à prendre en compte pour comprendre la durabilité de cette activité qui regroupe des milliers de personnes au Merapi. Dans le cas de la Boyong, Lavigne et Thouret (2002) ont évalué le stock disponible à environ $2,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ après l'éruption de 1994. Moyennant un rythme de creusement anthropique évalué entre $193\,200$ et $114\,800 \text{ m}^3/\text{an}$, la durée de vie des trois sites de la vallée peut être estimée à 14 ans environ, soit environ 5 ans par site à partir de 1998 (date du dernier lahar). Cette estimation semble plausible, dans la mesure où en 2008, la plupart des sites de la Boyong n'était plus exploités par des carrières, mais tournés vers l'agriculture, suite à l'épuisement de la ressource depuis 2003-2004. D'autre part, cela rejoint les prospectives faites par Priyo Hutomo en 1996 pour cette même vallée (Priyo Hutomo, 1997), qui donne 14 ans comme durée de vie moyenne de l'exploitation dans la Boyong. À la fin de la décennie 2000, seul le site en amont de Turgo s'est maintenu, mais de manière ralentie. Dans le cas de la Gendol, le volume disponible après l'éruption de 2006 a été évalué à $13,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Charbonnier & Gertisser, 2008) ; avec un rythme de creusement égal à celui de 2010 ($1,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$), la viabilité du site aurait été d'environ 8 à 9 ans.

De manière théorique, les sites d'extraction sont viables jusqu'à une petite dizaine d'année (dans le cas de l'exploitation intense d'un stock $> 10^6 \text{ m}^3$) s'ils ne sont pas régulièrement renouvelés en matériaux volcanoclastiques. Ainsi, les sites d'extraction sont temporaires, reliés aux occurrences des lahars. Il ne s'agit pas d'une activité durable sur un endroit donné : sa répartition spatiale est fluctuante, et varie en fonction du tarissement de certains sites, au profit de l'ouverture d'autres zones d'exploitation.

2. Tarissement et fermetures des sites occidentaux : le déclin du bassin d'extraction de Magelang

Les travaux d'observations de Sudibyo dans la Putih, ont montré que le site de Jurangjero accueillait entre 650 et 700 camions par jour en 2002 (Figure 128).

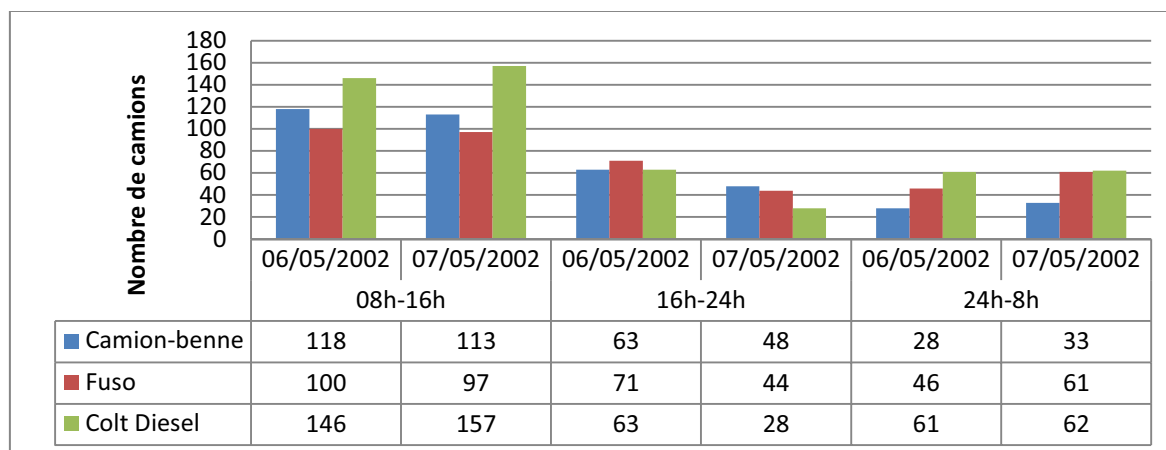


Figure 128 - Fréquentation (en nombre de camions) du site de Jurangjero, Putih, en mai 2002
(chiffres de Sudibyo, 2002)

Le site était ouvert de jour comme de nuit, permettant une exploitation incessante et expliquant les très importants volumes extraits dans la Putih estimés en moyenne à plus de $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ par an au milieu des années 2000. De même, le passage de plus de 250 camions-bennes de grande capacité (18 à 20 m^3) par jour a contribué à une exploitation, intensive de la ressource (Figure 128). Au début de l'année 2003, plusieurs occurrences de lahars à profondeur > 4 m ont eu lieu dans les rivières de l'ouest du Merapi, notamment dans la Senowo et dans la Putih (revue de presse, *KR*, 2 février 2003). Des dépôts de 3 m de haut sont laissés par ces lahars à Jurangjero : aussitôt, des centaines de travailleurs supplémentaires y affluent immédiatement pour profiter de cette aubaine (revue de presse, *KR*, 3 février 2003). Le nombre de camions passe des 650-700 comptabilisés en mai 2002 (Sudibyo, 2002) à plus de 900 (Bureau des Mines de Magelang, 2008). Le déclin des autres vallées de l'ouest (Pabelan, Lamat, Blongkeng) a pu commencer à ce moment là, amenant les travailleurs à se concentrer vers la Putih, ce qui justifierait l'augmentation du nombre de camions à Jurangjero. En outre, les lahars ont permis de renouveler les dépôts situés plus en aval dans la Putih, qui n'étaient plus exploités (revue de presse, *KR*, 19 février 2003). Le site de Jurangjero semble avoir acquis sa taille maximale autour de 2003-2004, qui s'étend très largement sur les talus médial et proximal de la Putih, mais déborde également dans la Batang et la Bebeng (Figure 129). D'après l'image satellite Quickbird de 2006, le site d'extraction de Jurangjero représente une surface de 335 ha (3,35 km^2), ce qui en fait une surface d'exploitation considérable. Cependant, la pression sur la ressource était telle que Jurangjero frisait la pénurie lorsque les occurrences de lahars vinrent à diminuer. Après les lahars de 2003, le rythme d'extraction perdure durant la saison sèche, pendant laquelle la fréquence d'occurrence des lahars a été nulle. Or la mousson de 2004 n'en a déclenché aucun, et Jurangjero s'est très vite retrouvé pratiquement tari. Cela a donné lieu à une *mujadah*, une manifestation religieuse, organisée dans la nuit du 1^{er} au 2 mars 2004. Des prières et des récitations du Coran diffusées par haut-parleur ont résonné à Jurangjero, soutenant la prière des dizaines de personnes réunies pour implorer

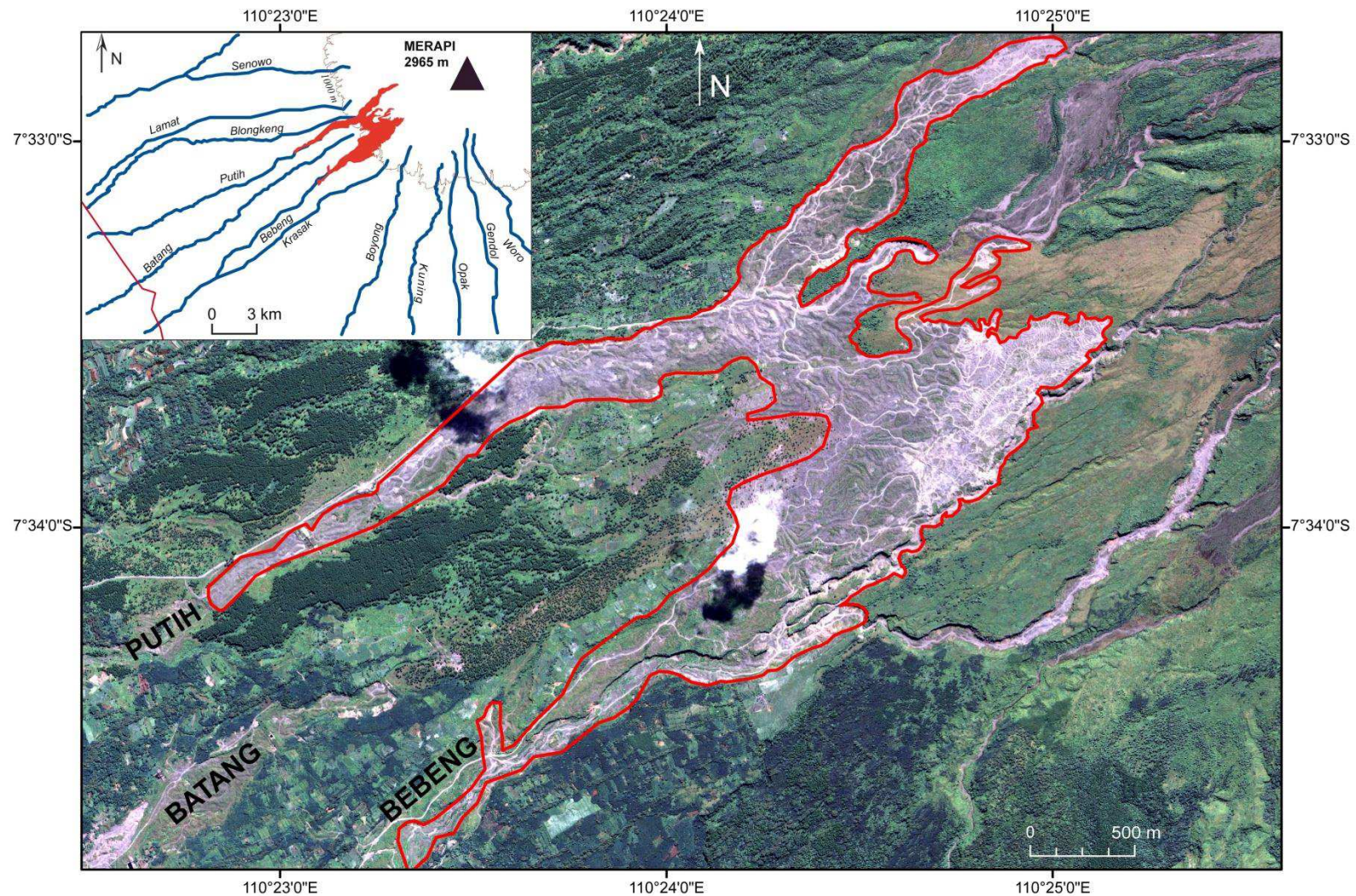


Figure 129 - Jurangjero en 2006 (Quickbird, 2006).

Le site d'extraction s'étend sur la partie proximale et médiale des bassins-versants Putih, Batang et Bebeng. Repérer les voies d'accès qui longent le site, ainsi que le dense réseau des chemins d'exploitation. Noter l'exploitation des berges de la Bebeng, leur donnant un aspect festonné, et l'extension de l'activité sur l'interfluve septentrional. Il s'agit du site d'extraction le plus vaste du Merapi (335 ha).

la faveur divine de faire s'écouler un lahar (revue de presse, *KR*, 3 mars 2004). Un tel exemple montre combien la définition même du lahar est intensément reliée à la ressource qu'il transporte pour les populations locales, au point parfois d'oublier qu'il reste un aléa. D'ailleurs, l'image Quickbird (Figure 129) montre l'extension des extractions sur les interfluves, et certaines berges du nord-est du site apparaissent largement entamées par les mineurs.

À la suite de l'éruption de 2006, dont les coulées pyroclastiques se sont répandues uniquement dans le bassin-versant de la Gendol au sud du volcan, le site de Jurangjero, ainsi que les autres sites de l'ouest du Merapi, ont très rapidement périclité. Pendant qu'une certaine proportion – inconnue – de travailleurs partaient tenter leur chance dans la Gendol, d'autres restaient pour extraire le peu de matériel restant dans les vallées de l'ouest. En 2008, les observations de terrain ont montré un site en déclin. Le total moyen de camions par jour n'excédait pas 72 véhicules, sur un site qui n'était plus guère ouvert qu'en journée. Le matériel retiré était un gravier de qualité médiocre, qui se vendait à bas prix (environ 20 000 Rp/m³, contre 50 000 Rp/m³ dans la Gendol). L'activité s'étendait vers l'amont de la vallée, dans des zones de plus en plus difficiles d'accès, et s'attaquait également aux berges, afin d'extraire le sable le moins altéré possible des dépôts volcanoclastiques anciens.

Un schéma d'évolution similaire a été observé dans les autres vallées de l'ouest du Merapi. Si les rapports officiels affirment l'existence d'extractions au début des années 2000 (Wiswakharman, 2001), les enquêtes de terrain ont montré que l'activité a disparu dans 5 vallées sur 9. Lorsqu'elle se maintient, comme dans la Senowo, c'est à des rythmes modestes, avec une trentaine de camions par jour en 2010. La plupart d'entre eux se rendent loin en amont, là où subsistent encore des dépôts exploitables, l'aval de la vallée étant de plus en plus dévolu à une activité agricole, même si certains continuent d'en entailler les berges pour éviter d'avoir à monter trop en amont. Au Nord du Merapi, dans la vallée Apu, la diminution de l'occurrence des lahars amène les travailleurs à s'attaquer aux berges, ou bien à récolter des matériaux plus grossiers tels des graviers qui se vendent à un prix très bas (revue de presse, *KR*, 5 mars 2009). Facile d'accès avec la rénovation d'un barrage doublé d'un pont, le site de la Apu fait partie des sites secondaires à la fin des années 2010, le seul du versant ouest depuis la suprématie du versant sud (Figure 127).

À la fin des années 2000, la plupart des sites du district de Magelang sont désormais des sites d'extraction mineurs, où les volumes pris sont largement inférieurs à ceux du nouveau bassin principal qui émerge dans la Gendol après l'éruption de 2006, alimenté par les dépôts qu'ont laissés les coulées pyroclastiques et qui ont été exploités au même titre que les dépôts de lahars.

3. Jambu-Kaliadem (Gendol) : une activité intense et l'affirmation du bassin d'extraction Gendol-Woro à la fin des années 2000

3.1 Fréquentation en 2009-2010

Alors que les carrières de l'ouest du Merapi se vidaient, de plus en plus de travailleurs affluaient dans la Gendol. Le stock pyroclastique ainsi formé en amont de la vallée à partir de 2006 a été propice au déclenchement de lahars entre 2006 et 2009, et à une intensification importante de la fréquentation de la vallée et des volumes extraits. Le site d'extraction de Jambu-Kaliadem étant partiellement situé sur le talus proximal du volcan, les carrières sont aménagées aussi bien dans les dépôts de lahars que dans les dépôts pyroclastiques mis en place en 2006 par l'effondrement du dôme.

Le propos s'appuie sur des données fournies par le Bureau des Mines de Sleman (2008 et 2009), ainsi que sur des relevés de terrain (2008, 2009 et 2010). Le nombre de camions pour la période 2010 est établi par la moyenne de quatre journées de comptage réalisés aux sites de Jambu-Kaliadem et d'Argomulyo (Figure 130 ; cf. chap. 2).

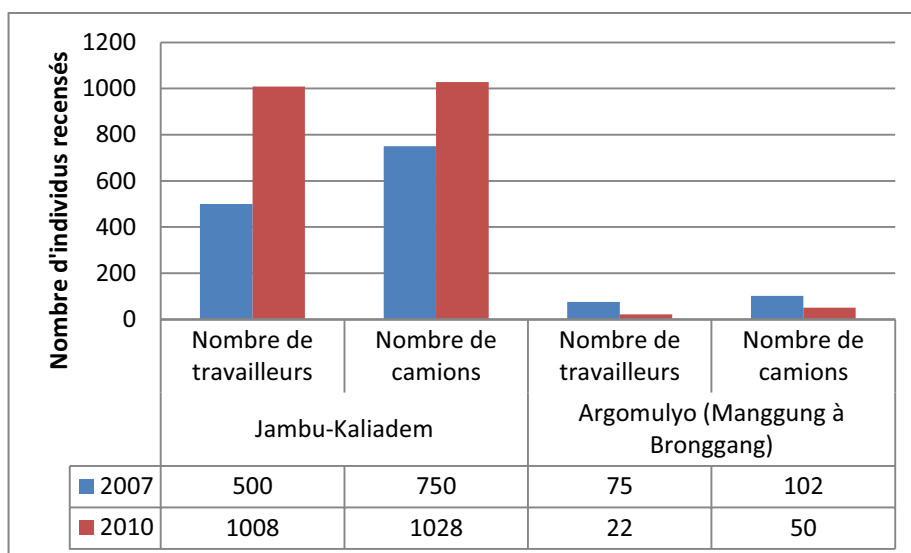


Figure 130 - Fréquentation (camions et travailleurs) sur deux sites de la Gendol (2007 : données Bureau des Mines de Sleman, 2008. En 2010 : données de terrain)

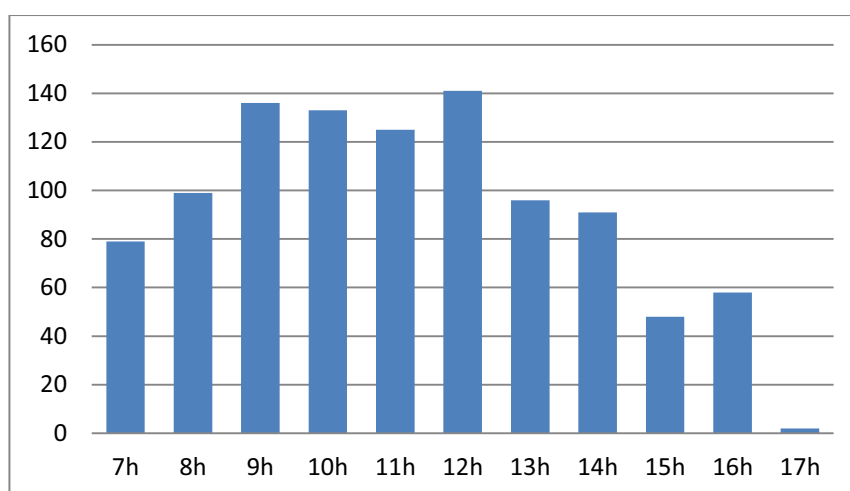


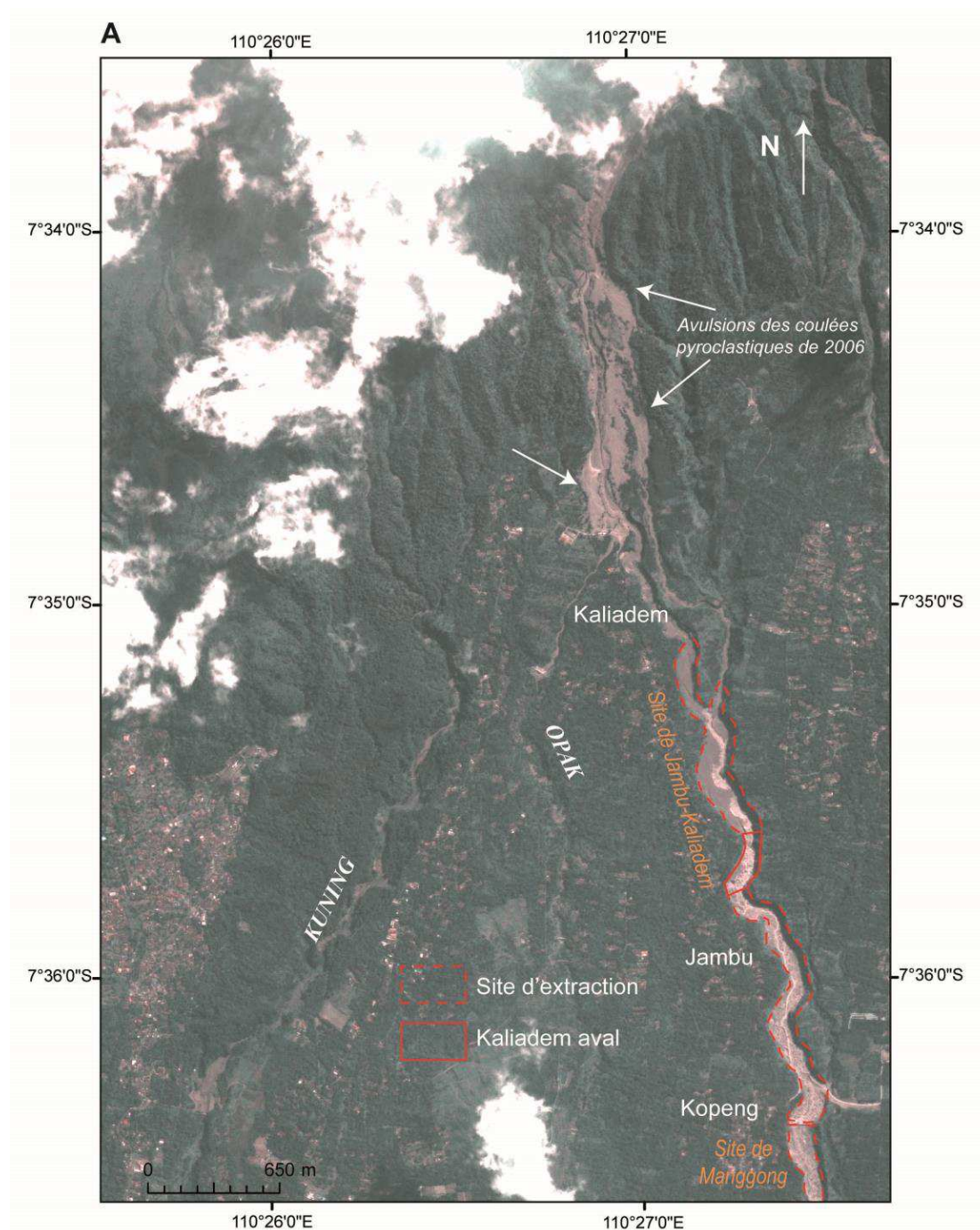
Figure 131 - Répartition horaire moyenne du nombre de passage de camions au péage du site de Jambu-Kaliadem en 2010 (De Bélizal *et al.*, 2011)

En quelques années, la fréquentation a doublé sur ce site de 32 ha (0,32 km²) qui s'est retrouvé quasiment saturé avant l'éruption de 2010, compte tenu de sa situation dans un fond de vallée encadré de versants de 40 à 50 m qui ne permettent pas l'étalement spatial de l'activité comme à Jurangjero (Figure 125C). Les encombrements dans le fond de vallée, voire sur les voies d'accès, étaient monnaie courante, surtout en fin de matinée (Figure 131). Entre 9h et 12h, plus d'une centaine de camions se trouvent sur le site. Une partie d'entre eux ont fini leur premier chargement, et quittent la vallée pour le vendre. D'autres arrivent, notamment ceux qui viennent de régions lointaines (hors Merapi, parfois plusieurs centaines de km). Après cette heure de pointe, la fréquentation diminue peu à peu, et la vallée est quasiment vide vers 17h, avant le coucher du soleil, puisque les extractions de nuit, à la fin des années 2000, étaient interdites. Le fond de vallée était creusé de 430 carrières où travaillaient des équipes de 4 à 5 personnes. D'après des mesures systématiques réalisées en 2010, plus de 46% d'entre elles avaient une profondeur comprise entre 1 m et 2 m, et 12% supérieure à 2 m. La profondeur de certaines carrières (> 3 m) était due à l'impossibilité pour une équipe de rechercher un autre endroit pour creuser une nouvelle carrière sur un site déjà saturé (Tableau 32, Figure 123).

Tableau 32 - Diamètre des carrières à Jambu-Kaliadem mesurés sur le terrain en mai 2010

Diamètre (m) \ Profondeur (m)	≤ 1	]1;2]	> 2	TOTAL
≤ 1	43	81	56	180
]1;2]	8	92	99	199
> 2	4	9	38	51
TOTAL	55	182	193	430

3.2 Une extraction intense : l'exemple de Kaliadem aval



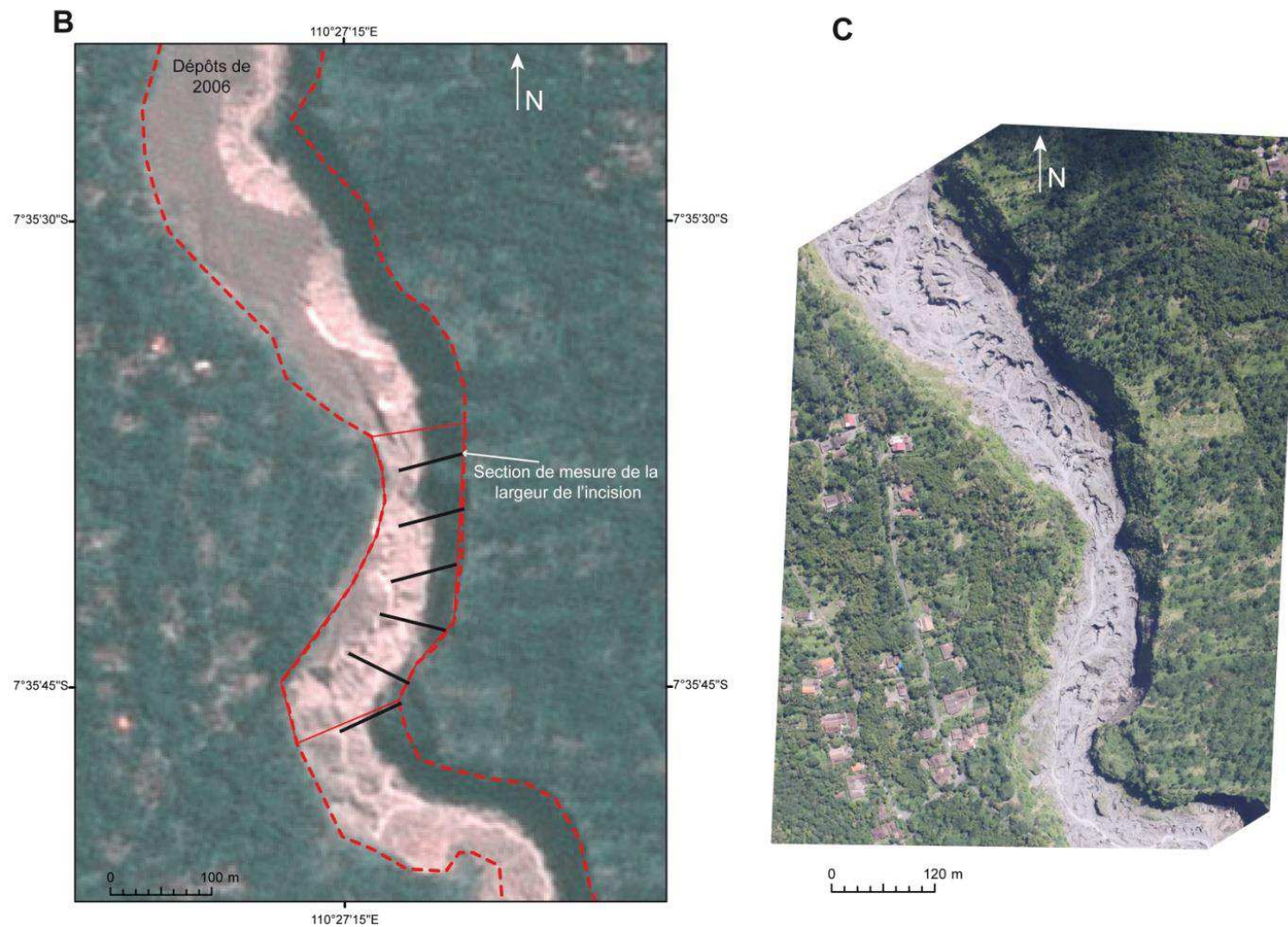


Figure 132 - "L'érosion anthropique" à Jambu-Kaliadem, l'exemple de Kaliadem aval. A : Vue générale (Spot 5, 2008). B : vue sur Kaliadem aval (contours en ligne pleine, Spot 5, 2008). C : Kaliadem aval (mission ULM, 2010).



La Gendol à Kaliadem aval en juin 2006.
Le fond de vallée est entièrement enseveli sous les dépôts pyroclastiques de l'éruption de 2006.



La Gendol à Kaliadem aval en août 2008
La moitié du fond de vallée est incisé, à la fois par les lahars (le corridor se développe le long de la berge orientale) et par les extractions. Près de $17000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ de matériel ont ainsi été emportés de 2006 à 2008.



La Gendol à Kaliadem aval en avril 2010.
La quasi-totalité des dépôts a été emportée, principalement par les extractions dont le rythme a doublé. Depuis 2008, l'érosion sur cette partie du site est évaluée à $35600 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$, dont la cause est essentiellement anthropique.

Figure 133 – Aperçu de l'évolution de la forme de la vallée à Kaliadem aval. En lignes pleines : profil de la Gendol lors de la prise de vue.

(photos: 2006, BPPTK Yogyakarta. 2008: F. Lavigne. 2010: E. de Bélizal).

Les dépôts de l'éruption de 2006 recouvrent entièrement le fond de vallée sur une dizaine de mètres d'épaisseur, et sont presque entièrement évacués quatre ans plus tard en 2010, notamment sur une portion de Jambu-Kaliadem, que l'on appellera Kaliadem aval (Figure 132A) où les changements ont été les plus marquants en trois ans. L'analyse diachronique des images de 2008 et 2010 montrent une très rapide érosion des dépôts de l'éruption de 2006 (Figure 132 B et C). À l'aide de données de terrain couplées à l'analyse de l'image Spot 5 (2008) et des photographies ULM de 2010, il est possible de reconstituer, sur cette partie du site d'extraction d'une surface de 3 ha, les rythmes de l'érosion. La largeur de la zone incisée a été mesurée sur 6 sections espacées de 50 m pour 2008 d'après l'image Spot 5 (Figure 132B, Figure 133). En 2010, l'extraction se pratique sur la largeur totale de la vallée d'après les relevés de terrain et les photos ULM, avec un réseau dense de chemins pour les camions (Figure 132C, Figure 133). L'incision des dépôts a été évaluée en 2008 et en 2010 au télémètre laser depuis les berges, sur ces mêmes sections. Le Tableau 33 donne les résultats suivants : entre 2006 et 2008, l'érosion atteint environ $16842 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, contre environ $35625 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ entre 2008 et 2010. Il y a ainsi une intensification du taux d'érosion qui double à partir de 2008, au moment où Jambu-Kaliadem devient le principal bassin d'extraction. Cette valeur d'érosion est très largement imputable à cette activité ; la remobilisation naturelle des dépôts éruptifs de coulées pyroclastiques du Merapi atteint $150000 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$, soit $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Lavigne et Thouret, 2002), en période de forte récurrence des lahars, ce qui n'était pas le cas entre 2008 et 2010. L'érosion à Jambu-Kaliadem, et notamment à Kaliadem aval, est donc particulièrement élevée, et témoigne d'une très forte contrainte anthropique sur les corridors de lahars. D'ailleurs, le faible nombre de lahars survenus entre 2006 et 2009 dans la Gendol et leur extension réduite sont peut-être rétroactivement causés par la diminution artificielle des sables du corridor de lahar, limitant le phénomène de *bulking* nécessaire à la dynamique du flux. L'intensité de l'activité d'extraction participe donc à la géomorphologie des corridors de lahars, dont ils accélèrent l'érosion.

Tableau 33 - Rythmes d'érosion sur une portion de Jambu-Kaliadem entre 2006 et 2010 à Kaliadem aval

2006-2008				2008-2010			
Largeur de l'incision (m)	Longueur (m)	Profondeur (m)	Erosion (m^3)	Largeur de l'incision (m)	Longueur (m)	Profondeur (m)	Erosion (m^3)
41	50	6	12300	93	50	8	37200
51	50	6	15300	75	50	7,5	28125
66	50	7	23100	84	50	7	29400
68	50	4	13600	106	50	7,5	39750
70	50	6	21000	104	50	7	36400
42	50	7,5	15750	108	50	8,5	45900

Total à Kaliadem aval (superficie 3 ha)	$\text{m}^3 / 3 \text{ ha} / 2 \text{ ans}$	101050	213750
	$\text{m}^3 / \text{ha} / 2 \text{ ans}$	33683,3	71250
	$\text{m}^3 / \text{ha} / \text{an}$	16841,7	35625

D'après les données fournies par le Bureau des Mines de Sleman, l'exploitation des dépôts pyroclastiques et volcanoclastiques de Jambu-Kaliadem apparaît assez variable sur l'ensemble d'une année, avec des rythmes mensuels généralement supérieurs à $20\,000 \text{ m}^3$ extraits par mois après l'éruption de juin 2006 (avant laquelle les extractions étaient indigentes, Figure 134A). Le léger ralentissement observé pendant la saison sèche de 2007 (Figure 134B) ne se retrouve pas aussi nettement les autres années. En 2008 c'est même l'inverse qui se produit, avec une période de saison sèche plus productive qu'en saison des pluies (Figure 134C). L'activité est extrêmement variable

d'une année à l'autre – impression peut-être d'ailleurs suggérée par une qualité discutable des données officielles – puisqu'elle n'obéit à aucun objectif de production rationalisé et encadré. On remarque que les blocs représentent en moyenne un tiers des volumes totaux extraits par mois.

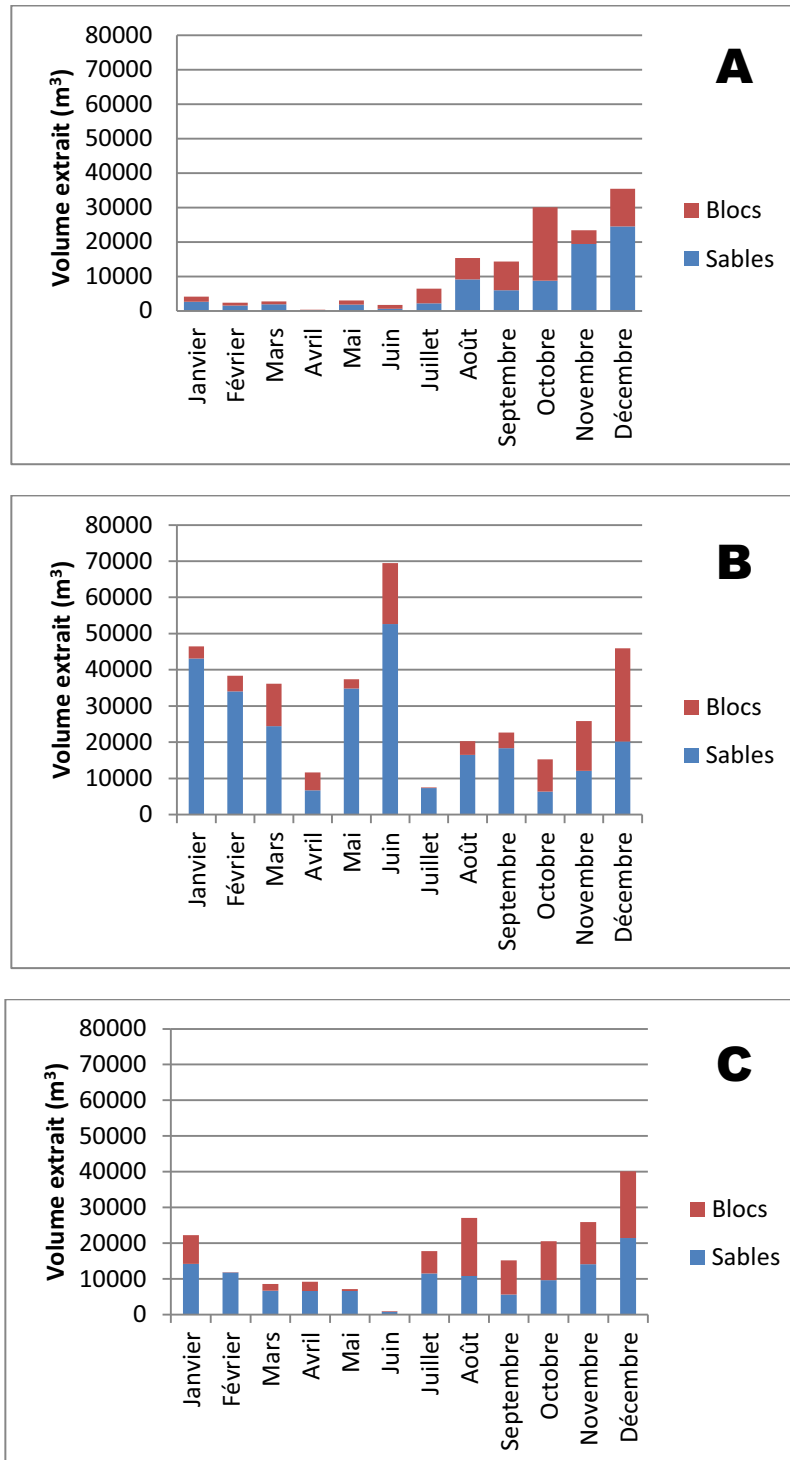


Figure 134 - Rythmes d'extraction par an à Jambu-Kaliadem (A: 2006; B: 2007; C: 2008). Données du Bureau des Mines et de l'Energie de Sleman.

3.3 Travailler sur un grand site d'extraction : résultats du questionnaire 2009 à Jambu-Kaliadem

D'après les chiffres officiels avancés par le Bureau des Mines de Sleman, on comptait près de 750 travailleurs les principaux sites d'extraction de la Gendol en 2007 contre plus de 1000 en 2010, principalement à Jambu-Kaliadem. La proximité entre le nombre de travailleurs et le nombre de passage de camions suggèrent que plusieurs véhicules ont fait des aller-retour au cours d'une même journée. Plus en aval de la Gendol, dans les sites d'extraction secondaires (Argomulyo), on ne comptait plus que quelques dizaines de personnes en 2010. Les informations qui suivent sont issues d'un questionnaire adressé à un échantillon de 30 équipes de travail situées à Jambu-Kaliadem en 2009 (De Bélizal *et al.*, 2011 ; voir annexe D.2).

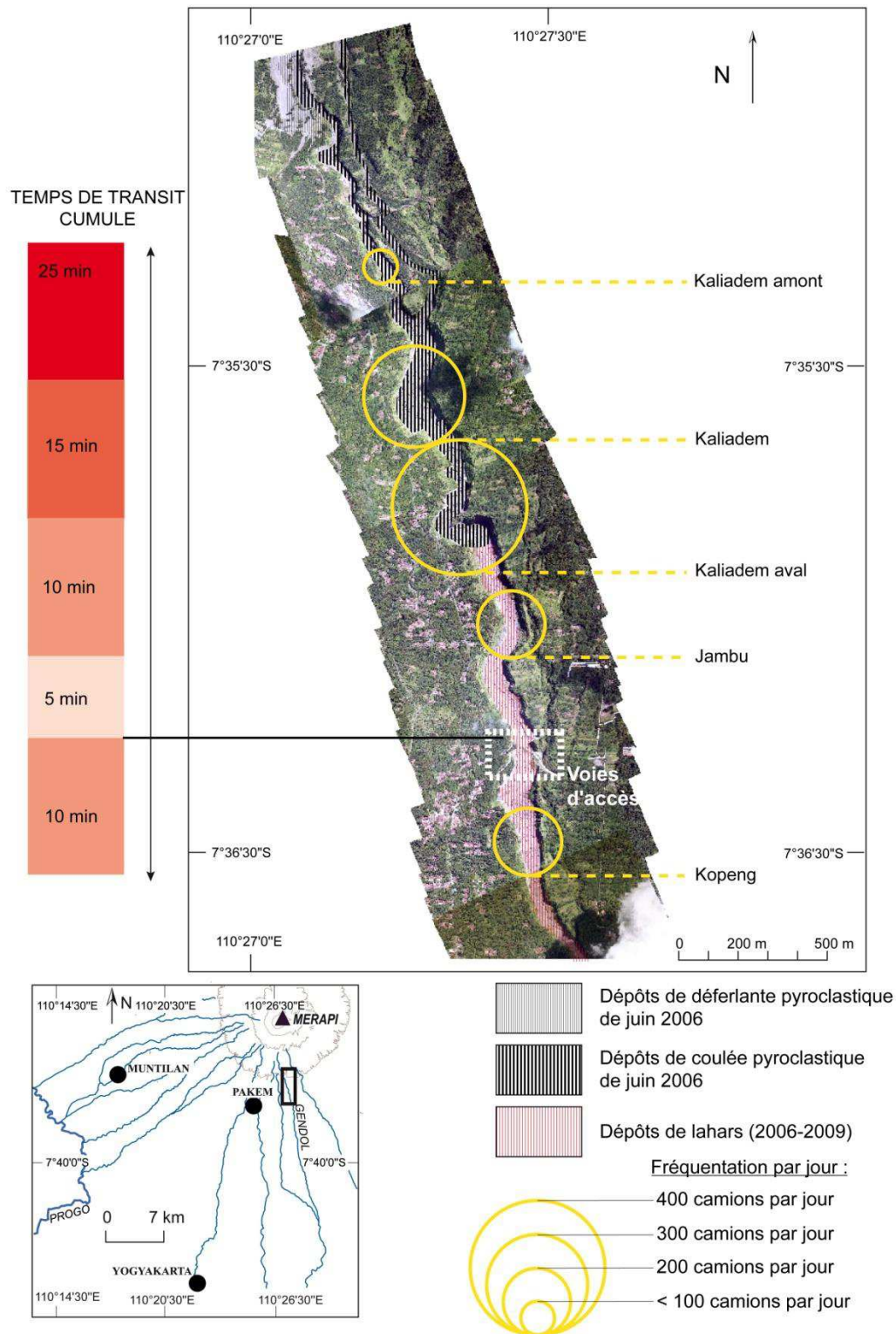
Certains travailleurs commencent très jeunes : 19% des répondants ont moins de 30 ans, et l'un d'eux est même âgé de 14 ans. Il travaille dans une équipe familiale, avec ses deux parents, depuis qu'il a récemment quitté le collège. Outre ces jeunes travailleurs, on trouve également des personnes plus âgées : 13% des répondants ont plus de 51 ans, pour un âge maximum de 70 ans sur l'ensemble de l'échantillon. Des prospections et des discussions informelles menées dans d'autres vallées du Merapi, comme celle de la Senowo, ont donné d'autres exemples de travailleurs âgés de plus de 70 ans ; il ne s'agit donc pas d'une exception. Par ailleurs, les hommes représentent la grande majorité des mineurs (87%). Les femmes travaillent le plus souvent avec leur famille ou leurs voisins, et les extractions sont toujours pour elles un complément de revenu, plutôt qu'une activité principale. Elles exercent souvent sur les sites des activités de sélection des matériaux : tamisage du sable, éviction des graviers et construction des terrils, mais il est possible également de voir des femmes creuser dans les dépôts.

L'organisation du travail se fait préférentiellement par équipes. Il est rare de croiser des travailleurs isolés sur les sites d'extraction importants (1 seul cas). Charge à eux de pouvoir s'intégrer à la journée dans une équipe déjà constituée pour participer au remplissage du camion s'ils souhaitent être rémunérés ; dans d'autres cas, ils ramassent des matériaux pour leur utilisation personnelle. Les équipes sont invariables (98% des équipes sont à composition fixe), formées selon des réseaux sociaux préexistant (famille, relations de voisinage...) de 5 à 9 personnes, et sont souvent indépendantes (17% travaillent pour une entreprise qui leur loue le camion). La plupart des travailleurs vivent à proximité de leur site d'extraction, ce qui montre à quel point cette activité est spontanée : la disponibilité des dépôts dans les corridors de lahars permet leur exploitation à tous ceux qui souhaitent en vendre pour gagner un peu d'argent. 88% des personnes interrogées déclarent ainsi résider dans l'un des villages adjacents du site de Jambu-Kaliadem, dans un rayon de 5 km. Seuls 6% viennent de Yogyakarta (à 22 km du site), et 6% de Klaten (15 km) ou Magelang (à plus de 40 km). On n'est donc guère surpris de constater que 36% des répondants se déplacent toujours à pied et 32% à moto pour venir travailler. Ceux qui résident le plus loin peuvent parfois demander à un camion de les avancer.

Sur leur site d'extraction, les travailleurs passent entre 6 et 10 heures par jour ; seuls 13% d'entre eux restent moins de 6 heures. Enfin, la plupart des travailleurs (81%) viennent tous les jours sur leur site. L'absence de règlement et d'encadrement officiel – mis à part les lettres d'autorisation émises par les gouvernements des districts – et l'aspect forcément très informel de cette activité permettent un rythme de creusement permanent et un accès souple au site, hormis pendant la nuit.

Dans le cas d'une extraction à destination commerciale, ce sont les chauffeurs des camions qui sont véritablement au cœur de l'activité : ce sont eux les vecteurs à la fois de la marchandise et du salaire. Un camion peut faire 2 aller-retour par jour, voire 3 s'il est rempli rapidement. Le temps pour charger un camion varie de 2 à 3 heures, en fonction du nombre d'équipiers, de leurs capacités physiques et de leur âge, ainsi que de la capacité du camion.

Dès 2008, la majeure partie des travailleurs est concentrée dans la partie amont du site d'extraction, aux lieux dits « Jambu » et « Kaliadem aval », où environ 300 et 400 camions vont et viennent chaque jour (Figure 135), à mesure que les parties plus en aval (au lieu dit Kopeng) s'amenuisaient. La croissance du site entre 2006 et 2010 a révélé un défaut structural lié aux voies d'accès (Figure 124).



Quand bien même les carrières se sont déplacées vers l'amont (Figure 135), aucun accès supplémentaire n'a accompagné ce mouvement. Une voie secondaire a été aménagée en 2007 sur le versant oriental, face à celle déjà existante à Kopeng (Figure 124), mais aucune route n'a été bâtie pour améliorer l'accessibilité des carrières de Kaliadem amont et aval. Les relevés de terrain ont montré qu'en moyenne, il faut près de 25 min à un camion pour se rendre depuis Kopeng jusqu'aux carrières de Kaliadem, à cause de la mauvaise qualité des chemins pratiqués dans les dépôts et des embouteillages quasi-permanents de mi-journée (Figure 135). Bien qu'en règle générale les lahars surviennent plutôt dans l'après-midi (Lavigne *et al.*, 2000a,b ; Lavigne et Thouret, 2002) lorsque la vallée est moins fréquentée, ces temps de parcours longs représentent un facteur de risque supplémentaire en cas d'alerte, et explique pourquoi nombre de camions ont été emportés par des lahars (voir infra IV, 2, 2.4).

Le taux de chômage de la région du Merapi est élevé (près de 10%) et la plupart des travailleurs ont déploré la grande difficulté à trouver du travail, dans quelque domaine que ce soit, et se sont donc tournés vers les extractions comme la seule échappatoire possible. Même l'agriculture, secteur traditionnel, n'offre plus suffisamment d'opportunités puisque les salaires y demeurent très bas pour ceux qui ne sont pas propriétaires, ce qui est de plus en plus en porte-à-faux avec des prix qui augmentent régulièrement pour les denrées de base. Un kilo de riz coûtait 3000 Rp en 2007 contre 5000 Rp en 2010. À Jambu-Kaliadem, les travailleurs gagnent entre 30 000 et 80 000 Rp par jour, soit plus du double voire du triple du salaire d'un agriculteur quotidien d'un agriculteur non propriétaire. En outre, des questionnaires réalisés à l'échelle des villages sur l'ensemble du volcan dans le cadre du programme MIA-VITA ont révélé que le niveau d'éducation moyen des travailleurs était généralement de niveau collège (scolarité jusqu'à 14-16 ans). Les transformations récentes de l'économie indonésienne depuis la crise de 1997 (De Koninck, 2005) et la surpopulation de l'île sont à l'origine des forts taux de chômage existant. Les travailleurs des carrières du Merapi sont donc des personnes généralement de faible niveau d'éducation, peu qualifiées, et qui n'ont d'autres ressources que cette activité. Cette urgence de trouver rapidement de l'argent amène la plupart d'entre eux à ne pas demander de demande officielle auprès des gouvernements régionaux, et à travailler dans l'illégalité la plus complète. C'est l'une des raisons pour laquelle la régulation de l'activité s'est révélée pratiquement impossible pour les gouvernements locaux : les extractions sont une activité spontanée qui répond à un besoin de travail pour des populations vivant sur une île surpeuplée, et qui ont du mal à s'intégrer aux circuits d'une économie en transformation.

4. Sites satellites, sites secondaires, et sites mineurs sur le versant sud du Merapi

4.1 Les sites satellites en aval de la Gendol (Manggong-Argomulyo) et sur la Opak (Pagerjuran)

Avant l'éruption de 2010, la quantité de dépôts disponible diminuait vers l'aval, cédant progressivement la place à l'agriculture, omniprésente à partir du village de Sindumartani. En aval de Jambu-Kaliadem, existent deux sites d'extraction : Manggong (15,2 ha, 0,15 km²) et Argomulyo (14,9 ha, 0,15 km²), installés dans un corridor de lahar endigué sur le talus distal (cf. chap. 3, II.1.2.2 ; Figure 136). Il s'agit de carrières à l'écart du réseau principal qui est axé sur l'amont de la vallée (Figure 127). Contrairement à Jambu-Kaliadem, qui depuis 2006 concentre l'essentiel de l'activité d'extraction sur la Gendol, mais aussi sur l'ensemble du Merapi, les sites Manggong et Argomulyo n'ont pas connu de croissance flagrante de leur fréquentation, qui est restée stable autour de 40 à 50

camions par jour (Bureau des Mines de Sleman, 2008- 2009). Les travailleurs qui viennent de loin préfèrent se rendre à Jambu-Kaliadem, où l'accès est facile, et le matériel disponible en plus grande quantité. À Manggong et Argomulyo, tout comme dans l'amont de la Opak (Pagerjurang, 2 ha), les carrières sont bien moins nombreuses qu'à Jambu-Kaliadem, et le nombre quotidien de travailleurs ne dépasse pas la cinquantaine de personnes. Il s'agit de sites *satellites* de Jambu-Kaliadem : si leur fréquentation demeure assez faible celle-ci est due avant tout à leur proximité avec le site principal. Bien desservis par les infrastructures routières, ils n'offrent qu'un matériel de qualité moyenne où les sables sont pratiquement absents, mais où, en revanche, la concurrence spatiale s'y trouve bien moindre qu'à Jambu-Kaliadem. En outre, ils bénéficient de la proximité des multiples *depo pasir* aménagés près de ce bassin d'extraction dynamique. Sans la proximité de Jambu-Kaliadem, il est évident que ces sites auraient été abandonnés au même titre que ceux qui parsemaient l'amont de la Kuning, ou bien auraient eu des fréquentations très faibles, identiques à celles des sites mineurs (type Boyong ou versant occidental à la fin des années 2000).



Figure 136 - Le site satellite d'Argomulyo. Cliché E. de Bélizal, mai 2010.

4.2 Les parties en amont des vallées Boyong (Turgo) et Woro (Balerante) : deux cas de figure opposés

Durant les années 2000, l'épuisement des sites d'extraction de la Boyong, peu à peu dévolus à l'agriculture, a provoqué le resserrement des carrières sur un seul site, à Turgo (7 ha), en amont de la vallée. L'exploitation passe de 250 000 m³ exploités en 1996 (Priyo Hutomo, 1997) à 193 200 m³ au début des années 2000 (données du Bureau des Mines de Sleman, 2008). Tout comme pour Manggong-Argomulyo, l'activité reste modeste, pratiquée uniquement par des riverains, à l'écart des rythmes effrénés et des embouteillages de Jambu-Kaliadem. À la fin de la décennie 2000, les carrières accusaient un certain recul, avec seulement 12 camions recensés en 2010, en milieu de journée uniquement, ce qui en fait un site « mineur » (Figure 127 et Figure 137A et annexes E.1.2 et E.2). L'éloignement du site et le mauvais entretien de son unique voie d'accès, associés à un manque de renouvellement de la ressource, expliquent ce déclin.

Balerante, en revanche, en amont de la Woro (15 ha), est un site dynamique avant l'éruption de 2010. Une moyenne de 210 camions a été évaluée sur une journée, soit près de 300 000 m³ de matériel extrait par an (Figure 137B ; annexes E.1.3 et E.2) ; cette fréquentation assez élevée est produite par trois facteurs. D'abord, un lobe formé par les dépôts des coulées et déferlantes

pyroclastiques de 2006 se situe à l'amont de la vallée sur le cône proximal, et a permis la formation de lahars qui ont nourri la Woro en blocs et en sables. Ensuite, Balerante n'appartient pas au district de Sleman comme la Gendol, mais fait partie du district de Klaten qui n'a jamais vraiment régulé les extractions. Avant l'éruption de 2010, cette vallée était la seule où des engins mécaniques étaient encore ponctuellement utilisés. Enfin, sa localisation, à l'est du Merapi, la rend plus accessible aux personnes résidant dans le district de Klaten, à de Solo (60 km à l'est) voire des villes du nord-est (Jepara). D'ailleurs, l'accès au site ne se fait que par l'est, par une route bien entretenue, tandis que celle du versant ouest, emportée par un lahar, n'a jamais été réparée. La Woro capte ainsi l'essentiel des flux de travailleurs venus de l'est du Merapi, où la fréquence d'occurrence des écoulements volcanogéniques est quasi-nulle. Il s'agit d'un site secondaire, au même titre que celui de la Apu, situé sur le versant septentrional du Merapi, où la construction d'un nouveau sabo-dam et d'un pont en 2009 a permis l'accès aux camions. Près de 280 ont été comptés par jour sur ce site d'extraction, qui est en 2010 l'un des plus importants du Merapi, et le seul vraiment dynamique en-dehors du versant méridional (Figure 127).



Figure 137 - Deux sites d'extraction du talus proximal. A : le site mineur de Turgo en avril 2010 ; B : le site secondaire de Balerante en juillet 2010. Clichés E. de Bélizal.

Durant les années 2000, l'activité d'extraction dans les vallées du Merapi a connu un déplacement de ses pôles d'activités depuis l'ouest du volcan vers le sud-est. Ces changements se font au gré des renouvellements des stocks en matériaux volcaniques apportés par les écoulements volcanoclastiques, mais aussi en fonction de l'intensité de l'exploitation. Après la suprématie de l'ouest du Merapi, dominé par la Putih, s'ensuit après l'éruption de 2006 l'affirmation du sud-est du volcan, dans la Gendol. Juste avant l'éruption de 2010, 70% des volumes de blocs et de sables provenaient de la Gendol, et principalement du site de Jambu-Kaliadem dont les caractéristiques générales ont pu être détaillées d'après les résultats d'un questionnaire réalisé en 2009. Les sites secondaires du versant sud (amont de la Boyong, aval de la Gendol et amont de la Woro) ont été également présentés. L'activité d'extraction semble suffisamment souple pour s'adapter de manière quasi synchronique aux évolutions environnementales du Merapi, par des phénomènes de vase communicants entre sites en déclin et sites où le stock a été renouvelé. L'organisation informelle et spontanée des sites d'extractions, qui sont avant tout un moyen de subsistance pour les populations locales, leur permettent une très grande facilité d'adaptation, mais, en contrepartie, rendent leur gestion et leur encadrement presque impossible pour les gouvernements locaux.

III. Un impossible encadrement institutionnel de l'activité

Les matériaux volcanoclastiques retirés dans les vallées du Merapi ont toujours été à la disposition des riverains souhaitant les utiliser pour leurs constructions. À partir de la fin des années 1980, l'explosion démographique et les transformations rapides de la société javanaise (De Koninck, 2005 ; Franck, 2010) associées aux facilités techniques (camions, pelleteuses et excavateurs) ont été les éléments déclencheurs d'une intensification des extractions jusqu'au milieu des années 2000. L'activité a pris des proportions importantes, a représenté des bénéfices de plus en plus élevés, et les gouvernements locaux ont tenté d'en codifier et réguler les flux. Les années 2000 ont ainsi été une période charnière des extractions dans les vallées du Merapi, lorsqu'ont émergé ses enjeux économiques et environnementaux, qui la rendent si difficile à gérer dans un contexte politique morcelé comme celui du Merapi.

1. Une activité lucrative

1.1 Matière première et produits manufacturés



Figure 138 - Construction de maisons à Bantul (sud de Yogyakarta). La structure de l'habitation est réalisée en béton fabriqué à partir du sable volcanoclastique du Merapi (premier plan). Cliché E. Prawoto, février 2009.

Le sable du Merapi se vend aussi bien dans les magasins de revente locaux que dans des stocks situés dans les grandes agglomérations de Java Centre comme Semarang ou Solo. Le rayonnement commercial de cette matière première dépasse largement le contexte local du Merapi. Le béton fabriqué à partir du sable du Merapi (Figure 138) est très recherché par certains architectes des grandes agglomérations indonésiennes comme Bandung, Surabaya ou Jakarta (Eko Prawoto, entretien, 2010). Avant l'éruption de 2010, le prix au m³ du béton pouvait alors atteindre 500 000 Rp (45 €) voire 800 000 Rp (75 €), soit plus de dix fois la valeur à laquelle la

matière première était achetée aux mineurs (Tableau 34). Le sable du Merapi est réputé dans toute l'île de Java, et n'a pas vraiment de concurrence. Les matériaux volcanoclastiques extraits des dépôts de lahars du Semeru ou de l'Anak Krakatau n'alimentent que les marchés régionaux et l'activité d'extraction demeure d'ailleurs plus modeste (De Bélizal, 2009). L'intégration du volcan Merapi au patrimoine culturel javanais permet certainement de favoriser l'attrait pour le matériel minéral qu'il fournit, ceci plus spécifiquement pour les blocs, qui représentent jusqu'à un tiers du volume total extrait (Figure 134). L'andésite transportée par les lahars du Merapi est reconnue comme la « pierre des temples » Borobudur et Prambanan. À Muntilan, sur la route de Borobudur, se trouvent ainsi de nombreux magasins de vente de statues religieuses ou profanes ainsi que d'ornements architecturaux réalisés à partir des blocs extraits des dépôts volcanoclastiques (Figure 139). La sculpture représente la transformation principale des blocs du Merapi, et certains gros ateliers, surtout localisés à proximité de



Figure 139 – Atelier de sculpture d'andésite à proximité de la rivière Senowo (cliché D. Grancher)

la Senowo et de la Pabelan, vendent non seulement leurs œuvres aux touristes sur la route des temples, mais reçoivent également des commandes de l'étranger. Certaines réalisations religieuses de plusieurs millions de rupiahs (centaines d'euros) trouvent des acquéreurs aux Philippines ou en Asie du Sud-est continentale (Pak Suyatno, entretien, mai 2011). Quant à l'ornementation architecturale, elle alimente également des flux commerciaux dont les réseaux relient le Merapi non seulement à l'ensemble de l'archipel indonésien, mais aussi au Golfe persique, au Maghreb et à l'Europe.

Une usine de polissage des blocs située à Plumbon le long de la Gendol a pour spécialité la confection de tomates d'andésite (Figure 140), et reçoit des commandes parfois très spécifiques comme celle du palais princier de Surakarta (Solo), qui exigeait que les dalles de l'une des cours soient réalisées uniquement en pierre du Merapi (Pak Siswanto, entretien, 2010). La plupart du temps, cette usine qui emploie 25 salariés à temps plein (venant parfois de districts éloignés du Merapi) produit des ornements architecturaux pour des centres commerciaux (*malls*) de Jakarta, de Bandung, de Yogyakarta ou de Surabaya. Ils vendent également

des dalles ou tomates en gros à des entreprises d'export qui ensuite les expédient en Asie-Pacifique (Malaysia, Taïwan, Japon) ou en Inde. Les blocs d'andésite sont achetés 700 000 Rp le camion de 4 m³, puis sont débités, taillés et polis ; le produit fini est vendu environ 1,3 million Rp / m³ (environ 100 €). L'entreprise n'utilise que les blocs d'andésite de Jambu-Kaliadem, plus récents car déposés pendant et après l'éruption de 2006. Jusqu'au début des années 2000, l'essentiel de la matière première provenait de la Boyong, mais la qualité devenait de plus en plus mauvaise d'année en année, avec des



Figure 140 – Tomettes fabriquées en andésite à proximité du site d'Argomulyo (cliché D. Grancher, août 2009).

blocs partiellement recouverts de mousse, altérés et trop friables qui se fragmentaient trop vite lorsqu'ils étaient sciés. L'entreprise de Pak Siswanto n'est pas un cas isolé au Merapi : on retrouve des ateliers similaires notamment à Klaten, à proximité de la Woro. L'un d'eux, à Kemalang, emploie jusqu'à 60 ouvriers et produit du matériel d'ornementation (lanternes de jardin, colonnettes pour auvent, fontaines et bassins à koï japonais...) exporté jusqu'en péninsule arabique. La forte demande permet de soutenir ces différents ateliers d'artisanat qui ne se font pas de concurrence, et sont même souvent obligés de refuser certaines commandes (Pak Siswanto, entretien, 2010).

Les dépôts de lahars du Merapi fournissent ainsi une matière première demandée, permettant de placer le volcan au cœur de réseaux commerciaux d'échelle planétaire, même si l'essentiel de la production est vendu et transformé sur l'île de Java. Au vu des recettes que représentent la vente des

sables et les blocs, on comprend combien cette activité apparaît lucrative, permettant d'assez bien rémunérer les travailleurs, mais apportant également une substantielle source de revenus aux gouvernements locaux. Cependant, c'est justement cette manne financière qui a été le fossoyeur du développement raisonné et équitable de l'exploitation des dépôts volcanoclastiques, en raison de la puissante corruption qu'elle a provoqué.

1.2 Des salaires variables mais globalement élevés pour les travailleurs



Figure 141 – Un riverain de la Gendol vient s'approvisionner en matériaux volcaniques pour sa consommation personnelle
(cliché D. Grancher, août 2009).

Les matériaux volcaniques sont une matière première privilégiée, au cœur d'un réseau d'échanges complexe générant des bénéfices considérables tout au long des années 2000. La vente se fait de trois manières différentes :

- Les travailleurs revendent la matière première à des magasins de revente en gros, les *depo pasir* (voir supra I. 1, 1.2).
- Les travailleurs sont salariés d'une entreprise (de BTP le plus souvent), qui s'occupe elle-même de la transformation du matériel et de sa commercialisation.
- Les travailleurs indépendants revendent au détail une partie de leur marchandise. Ils ne remplissent pas de camions,

seulement de petits paniers (Figure 141).

Le premier cas de figure est le plus répandu autour du Merapi : la majorité des flux de matériaux volcaniques transitent par ces *depo pasir*, situés à proximité des sites d'extraction ainsi que sur les principaux axes routiers. Le tableau suivant (Tableau 34) donne une estimation des prix pratiqués en 2009 et en 2010, au m³ dans la région du Merapi. Lorsque le matériel est vendu hors Merapi, les prix peuvent doubler. Les blocs valent deux fois le prix du sable présenté au Tableau 34.

Tableau 34 – Estimation des prix du sable du Merapi en 2010

(De Bélizal *et al.*, 2011 ; comparaison avec 2001 selon Yachiyo, 2001).

Districts	Prix d'achats dans les magasins de revente (x 1000 rupiah)		Prix de vente pratiqués par les magasins de revente (x 1000 rupiah)		Évolution 2001-2010 (%)
	au m ³	par camion (4m ³)	au m ³	par camion (4m ³)	
Yogyakarta/Magelang	50 à 60	200 à 250	100 à 120	400 à 500	× 2
Klaten	50 à 70	200 à 400	140 à 160		× 2

En général, les *depo pasir* revendent le sable au double du prix qu'ils l'ont acheté. En 2010, avec plus de 1 000 camions évalués dans la Gendol par jour, si l'on part de l'hypothèse que la totalité d'entre eux ont revendu leur chargement aux *depo pasir*, le bénéfice total dégagé est d'environ 250 millions à 300 millions de rupiahs par jour (en fonction du lieu de revente), soit environ 24 000 euros. Les travailleurs sont assurés d'obtenir un salaire quotidien élevé, supérieur à ce qu'ils pourraient gagner en temps qu'agriculteur. En prenant l'exemple d'un camion de sable vendu dans un *depo pasir* de la région du Merapi, le chauffeur gagne entre 200 000 et 250 000 Rp. La moitié de cette



Figure 143 - Vendeuse de fritures et de thé qui profite d'un camion pour se rendre dans les vallées. Jurangjero, vallée Putih (E. de Bélizal, août 2008)

du volcan à la fin des années 1990, une tendance qui s'est nettement confirmée, mais selon des rythmes différents, après l'éruption de 2010 (cf. chap. 7). En outre, autour de l'extraction des dépôts d'origine volcanique se sont greffées de multiples autres activités, qui en dépendent et qui la complètent. Des hommes et des femmes issus des villages voisins se rendent sur les chantiers pour vendre du riz, des beignets de fruits ou de soja, des pâtisseries et des boissons aux travailleurs ; ils profitent souvent des camions, utilisés pour le transport des sables et blocs, pour effectuer leurs trajets dans les remorques (Figure 143). Également, des enfants ou de jeunes adolescents bouchent les nombreuses ornières qui parsèment les routes d'accès aux vallées empruntées par les camions à l'aide de fins graviers et de palmes séchées, en échange d'une maigre rétribution de la part des chauffeurs (Figure 142). Les entretiens réalisés en 2010 dans la Gendol ont même révélé l'existence de prostitution à Jambu-

somme est consacrée à l'entretien du véhicule, aux frais d'essence et à la location si le véhicule est loué. Une petite partie (entre 8 et 10%) sert à payer l'accès au site lorsque celui-ci est payant. Le reste est réparti entre les membres de l'équipe, qui peuvent ainsi obtenir chacun autour de 20 000 Rp par chargement, dans le cas d'un groupe de cinq personnes. Cette somme est doublée ou triplée en fonction du nombre d'aller-retour que fait le camion dans une seule journée, ce qui permet à certaines personnes de gagner quotidiennement autour de 40 000 à 60 000 Rp, voire plus (Sudibyo, 2002). Ces chiffres peuvent être comparables aux salaires mensuels de certains fonctionnaires indonésiens (employés municipaux, enseignants), sans en avoir, bien sûr, la régularité ni la sûreté. On comprendra en tout cas pourquoi les extractions sont une activité vers laquelle se sont tournés des milliers de personnes pendant les années 2000. Sudibyo (2002) évoque le cas de certains travailleurs venant de Temanggung ou de Wonosobo, qui sont des districts situés quelques dizaines de kilomètres à l'ouest du Merapi.

Pendant deux à quatre semaines, ces travailleurs travaillaient sans relâche, dormaient même sur les sites d'extraction, et rentraient chez eux après avoir amassé quelques centaines de milliers voire plus d'un million de rupiahs. La rapidité des bénéfices dans les carrières des vallées du Merapi attirait déjà des travailleurs venus hors



Figure 142 - Un adolescent rebouche les ornières dans l'une des voies d'accès au site de Jurangjero dans la vallée Putih (E. de Bélizal, août 2008)

Kaliadem. Les sites d'extraction sont ainsi une activité autour de laquelle s'en cristallisent d'autres de tous types, et qui joue par là-même un rôle structurant dans l'économie locale et régionale du volcan Merapi.

Après l'effondrement partiel de la monnaie indonésienne en 1997 et la difficulté de trouver un emploi stable et suffisamment rémunérateur pour des populations qui n'ont pas fait d'études supérieures (1,2% des personnes interrogées en 2011 ont une formation universitaire ou équivalente), l'extraction de matériaux volcaniques représentait un moyen efficace de gagner très rapidement de l'argent. En 1997, 4% de la population indonésienne était au chômage, contre 12% en 1999 (ONU).

1.3 Une source de bénéfices pour les gouvernements locaux

D'après le tableau des prix pratiqués en 2010 (Tableau 34), on peut estimer à 115 milliards de rupiahs (soit 10 millions €) les ventes de matière première, sans tenir compte des multiples transformations et reventes qui peuvent suivre, ce qui est considérable. Comprenant que l'activité d'extraction produisait des bénéfices très élevés, les gouvernements locaux ont très vite cherché à taxer cette activité. À Magelang, entre 1997 et 2002, les revenus de la taxe (péages) ont rapporté au gouvernement local près de 7 milliards de rupiah (600 millions d'euros, Figure 144).

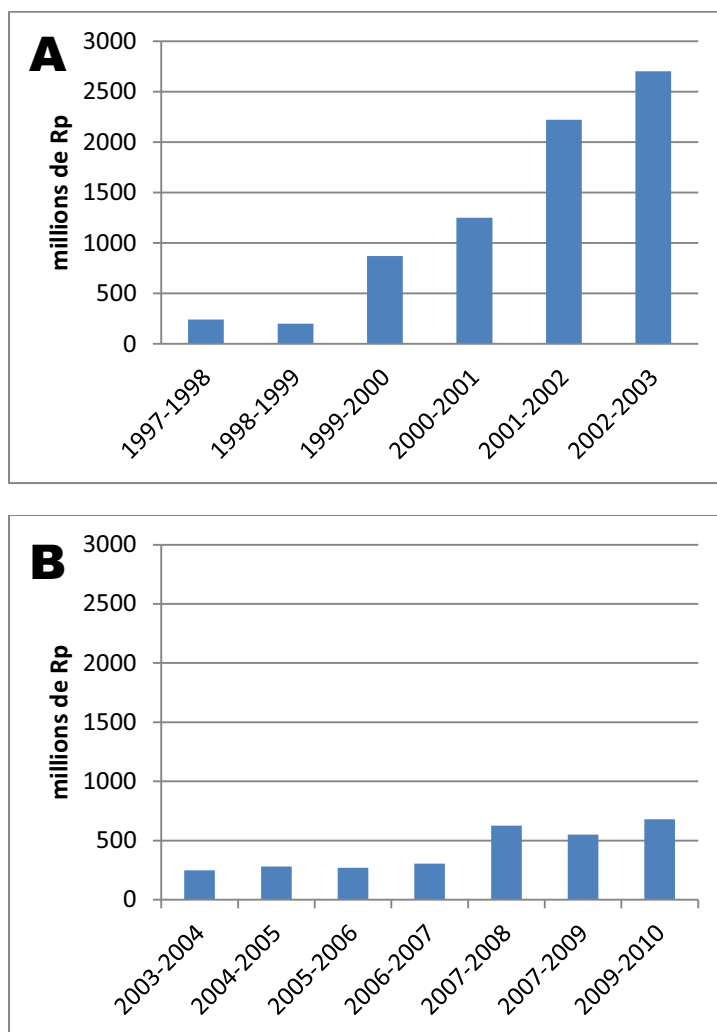


Figure 144 - Recettes annuelles de la taxe gouvernementale sur les extractions de matériaux volcaniques.

A : dans le district de Magelang entre 1997 et 2003 (Sudibyo, 2002)

B : dans le district de Sleman entre 2003 et 2010 (données du Bureau des Mines et de l'Énergie de Sleman)

On observe une nette augmentation du total récolté par an en 1999-2000, qui mérite toutefois une légère nuance. Les effets de la crise économique de l'Asie du Sud-est survenue en 1997 provoquent un taux d'inflation de la rupiah de 60% à la fin des années 1990, ce qui peut jouer sur les valeurs du diagramme (Figure 144A). Malgré tout, la tendance générale est bien à l'augmentation, montrant que le nombre de travailleurs et de camions est croissant sur cette période. La même évolution est sensible dans la région de Sleman pour la période 2003-2009, avec un revenu global des taxes qui a presque triplé en 6 ans (Figure 144B). Sept péages ont été institués en 2003, au plus fort de l'exploitation de la Boyong. Le total a d'ailleurs doublé entre 2006 et 2007, compte tenu de l'explosion de fréquentation des sites de la Gendol après l'éruption de 2006. La plupart se trouvent près de la Gendol et de la Boyong, qui étaient les deux rivières les plus exploitées, et sur les routes forcément empruntées par les camions.

De nombreux villages ont également mis en œuvre des péages locaux destinés à entretenir une caisse commune utilisée notamment pour l'entretien des routes endommagées par le passage répété des poids lourds. Il n'existe pas d'harmonisation des tarifs pratiqués (entre 3 000 et 5 000 Rp à Magelang et Sleman entre 2008 et 2010), pas plus que de régularité dans l'ouverture de ces péages. Il arrivait que ceux-ci soient ouverts, ou au contraire clos, indépendamment des jours et des horaires. La tenue de ces péages était souvent laissée aux responsables des *pos kamling* (guérites de surveillance de villages, cf. chap. 4, III. 3..1).

Il n'a pas été possible d'obtenir du gouvernement de Magelang les données postérieures à 2003, compte tenu des rigueurs administratives évoquées au chapitre 2 de ce mémoire, et qui empêchent la libre consultation des registres. D'après les responsables régionaux, l'activité d'extraction a périclité dans les années 2000, et les péages ont fermé. Toutefois, cela ne cadre pas avec les reconstitutions des volumes émis (voir *supra*), ni avec les observations de terrain faits en 2008. Si le site principal de Magelang, Jurangjero dans la Putih, a effectivement fermé en 2009, il a néanmoins été très actif jusqu'en 2004, et l'activité, même réduite, s'y est maintenue jusqu'en 2008 au moins. L'absence – ou la dissimulation – de données précises quant aux revenus financiers issus des extractions semble liée à l'échec d'encadrement solide de l'activité par les pouvoirs publics, et la progressive confiscation des bénéfices par des organisations parallèles pendant les années 2000 à Magelang.

2. Un cadre législatif confus : une régulation théorique qui peine à se mettre en pratique

2.1 Des acteurs entre gouvernements, syndicats et mafias : une gestion fractionnée et conflictuelle

La structure interne du cadre législatif des extractions autour du Merapi ne laisse pas d'étonner par sa complexité. L'administration indonésienne est une jungle d'acronymes qui désignent des services et des bureaux liés entre eux par des relations de subordination et d'interaction difficiles à synthétiser. La tâche est d'autant moins aisée que l'espace du Merapi est réparti sur les territoires de quatre districts (Magelang à l'ouest, Boyolali au nord et à l'est, Klaten au sud-est, Sleman au sud) eux-mêmes répartis sur deux provinces (Sleman fait partie de la Région Spéciale de Yogyakarta, tandis que les trois autres sont situés à Java-Centre), dont les institutions ne suivent pas exactement les mêmes dénominations. Les paragraphes qui suivent tenteront d'en dévoiler les arcanes parfois un peu obscurs. Les données proviennent essentiellement d'entretiens réalisés avec plusieurs responsables (cf. chap. 2).

2.1.1 Le gouvernement : un fourmillement bureaucratique

Que ce soit à Magelang, Sleman, Klaten ou Boyolali, il n'existe pas d'instance politique spécifique en charge des extractions des dépôts du Merapi. Sa gestion est faite de manière collégiale entre plusieurs services distincts qui n'ont pas les mêmes domaines de compétence, et n'ont pas tous fait entendre leur voix de manière égale au cours des vingt dernières années (Figure 145). L'office en charge des mines et de l'énergie de chaque district (dont le nom et l'importance varie d'un district à l'autre) coopère avec le Proyek Merapi (ingénieurs chargés de l'aménagement des infrastructures et ouvrages d'art sur le Merapi, dépendant du ministère des Travaux Publics) et avec le BPPTK (bureau de la volcanologie de Yogyakarta en charge, entre autres, de la question des aléas volcaniques, dépendant du Ministère des Mines et de l'Énergie). À partir de 2002, le TNGM (Parc National du Merapi) est également un acteur à part entière de la gestion des extractions. Dans chaque district, l'assemblée qui s'en occupe est composée de délégués envoyés par chaque service, chargés de défendre leurs intérêts propres plutôt que de promouvoir une politique commune de gestion axée sur et pour les extractions. Avant l'éruption de 2010, le Proyek Merapi et le TNGM exigeaient de fréquentes fermetures des sites pour éviter l'endommagement des barrages et des forêts, tandis que l'office des mines de l'énergie de chaque district avait plutôt tendance à favoriser les extractions qui rapportent de substantiels revenus. Le BPPTK veillait à l'instrumentation de systèmes d'alerte (sirènes), afin de pouvoir avertir les travailleurs de l'imminence d'une éruption ou d'un lahar (Figure 145).

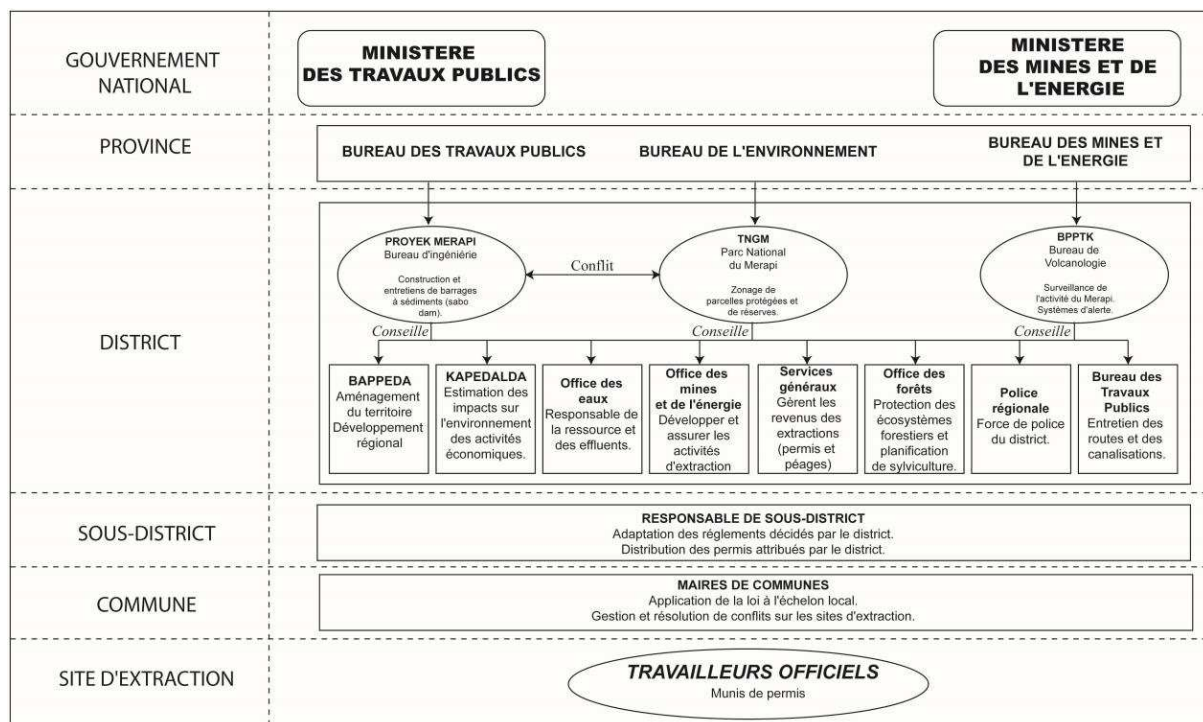


Figure 145 - Organigramme simplifié de la gestion publique des extractions dans le district de Magelang.

Les travailleurs « illégaux », , démunis de permis – et qui représentent la grande majorité des mineurs – ne sont donc encadrés par aucune instance administrative. Cela a pu justifier l'émergence de structures de gestion parallèles à tendance mafieuse.

Outre ces acteurs, l'échelon administratif supérieur, celui de la province, peut imposer aux districts la décision d'une régulation : en 1994, la province de Java-Centre a imposé aux districts autour du Merapi (sauf Sleman, qui n'appartient pas à la même province) de mettre en œuvre une surveillance accrue des sites d'extraction mécanique. S'il existe bel et bien une volonté certaine de

mieux comprendre et centraliser cette activité à l'échelle des districts, aucun organisme de gestion intégrée des extractions n'existe : celles-ci ne sont qu'un problème parmi d'autres liés au Merapi, mais ne sont pas dirigées pour elles-mêmes. Il en ressort ainsi un éclatement administratif fort préjudiciable à l'encadrement de cette activité, *de facto* inefficace à cause de la nébuleuse bureaucratique complexe et redondante en charge de sa gestion. La Figure 145 montre l'emboîtement des échelons administratifs, et l'abondance de services et de bureaux qui forment le comité de gestion des extractions, dans le cas de Magelang. Outre l'absence de bureau spécifique permanent, la gestion publique des extractions se heurte à un défaut structurel majeur : le manque de moyens d'encadrement. Les observations de terrain ont montré l'absence systématique de surveillance sur les sites d'extraction, dans quelque district que ce soit : des lois existent, mais le contrôle de leur application ne semble pas s'exercer. Par ailleurs, beaucoup de fonctionnaires semblent ne pas se préoccuper de cet encadrement impossible à réaliser, et l'ambiance dans les bureaux gouvernementaux confine au fatalisme découragé : il s'agit selon eux d'une activité tentaculaire, impossible à gérer de quelque façon que ce soit (Pak Manis, entretien, 2010 ; Pak Purwanto, entretien, 2010). La situation est donc propice à l'illégalité, ainsi qu'aux formes parallèles de gestion.

2.1.2 Les acteurs privés : entreprises, syndicats et mafia

Comme la gestion publique des extractions demeure inadaptée, place est faite à des structures privées pour combler les lacunes du système de gestion gouvernemental. Il s'agit d'abord des entreprises qui emploient des mineurs. Il existe deux statuts possibles : les CV (*Commanditaire Venootschap* : SCS, Société en Commandite Simple) et les PT (*Perseroan Terbatas* : SARL, Société à Responsabilité Limitée). Pour être officiellement reconnues, elles devaient payer un permis spécial, le SIPD-PR (*Surat Izin Pertambangan Daerah PeRusahaan*, Permis d'Exploitation pour Entreprises), qui est une version spécifique du permis de travail concédé aux travailleurs individuels (SIPD). En général, leurs activités fonctionnaient bien, et ces entreprises étaient en grande expansion (Yachiyo, 2001 et 2009 ; Pak Anton, entretien, 2009). Une réelle concurrence existe entre ces sociétés, mais les prix pratiqués étaient globalement les mêmes, avec éventuellement une différence de 5 000 Rp par m³ de matériaux en moyenne (Yachiyo, 2009 ; Pak Anton, entretien, 2009). Le fonctionnement des entreprises intègre, de manière schématique, l'ensemble du système d'extraction des matières premières, leur stockage et leur revente en circuits fermés, ou alors en circuits ouverts (vente à des *depo pasir* indépendants). Certaines ont été particulièrement importantes, au point de jouer un rôle structurant dans l'organisation régionale de l'activité, avec pour quelques-unes des tentations hégémoniques, dépassant le cadre régional du Merapi. En effet, il était fréquent que leur siège social soit localisé dans une grande ville extérieure au Merapi, comme Semarang (grande agglomération à vocation métropolitaine, capitale de la province Java-Centre, troisième grand port indonésien). D'après les enquêtes de terrain, deux exemples majeurs méritent d'être cités. *Pengusaha Pemasaran Pasir* (Entreprise de vente du sable) était une union des revendeurs de matériel volcaniques, localisés dans les agglomérations du pourtour du Merapi (Solo, Magelang, Yogyakarta). La plus grande entreprise de l'ouest du Merapi au cours des années 2000 fut cependant *Perusahaan Daerah Aneka Usaha Tambang Galian Golongan C Kabupaten Magelang* (Entreprise minière de la région de Magelang). Cette entreprise avait un statut hybride entre possesseurs privés et publics, puisqu'une partie des capitaux appartenait au district de Magelang (loi 14 de 1998). Son rôle était d'effectuer des missions de prospection puis d'exploitation dans les vallées du Merapi. Au début des années 2000, elle a cherché à contrôler l'ensemble du circuit économique de l'extraction de matériel volcanique : extraction, transport, traitement, purification et commercialisation afin de proposer un cadre plus sûr et moins informel à l'activité. Les bénéfices engendrés étaient supposés « permettre d'augmenter la prospérité des communautés du Merapi » (Sudibyo, 2002). En 2000, elle a rapporté près de 120

millions de rupiahs au gouvernement soit environ 10 000 € (Wiswakharman, 2001), sans que l'on sache très bien comment a été ensuite utilisé cet argent pour « augmenter la prospérité des communautés du Merapi ». Ce genre d'initiative visant à intégrer en un seul groupe économique l'ensemble des activités n'a pas été suivi. Dans la région de Sleman, au milieu à la fin des années 2000, peu d'exemples similaires peuvent être relevés, compte tenu d'une très grande incertitude quant au nombre réel de ces entreprises. D'après le gouvernement du district, la plupart des entreprises à Sleman opèrent dans l'illégalité la plus complète – sans que cela les inquiète beaucoup, et aucun nom, aucune donnée (capitaux, effectifs d'employés) n'ont pu être obtenus.

Les travailleurs qui ne sont pas employés d'une entreprise se sont très tôt regroupés en structures corporatistes et/ou syndicalistes, pour combler les lacunes d'encadrement de leur activité qui ne cessait de prendre de l'ampleur dans les années 1990. L'APPI (*Assosiasi Pengusaha Penambangan Pasir Indonesia*, Syndicat des Extractions de sable d'Indonésie) regroupe les travailleurs en valorisant des liens entre eux, des discussions, des réunions, pour développer un esprit de corps entre gens d'une même profession au début des années 2000 à Magelang (Wiswakharman, 2001 ; Yachiyo, 2001 et 2009). Cette dynamique corporatiste a duré tout au long des années 2000, mais a souffert de l'abandon progressif des sites d'extraction de Magelang (Sudibyo, comm. orale, 2008). Sa visibilité était assurée par une garantie de légalité puisque ne pouvaient en être membres que les travailleurs possédant un permis. Les chauffeurs des camions étaient également représentés par une association dont il n'a pas été possible de retrouver la trace lors des enquêtes de terrain, mais qui, d'après quelques rapports (Wiswakharman, 2001) a regroupé des effectifs assez conséquents au début des années 2000. Cette association, nommée *Paguyuban Kru Angkutan Pasir SPAISTAR* (Communauté des routiers du sable), avait pour objectif de favoriser le développement de l'activité d'extraction à des petits groupes de travailleurs préconstitués, en leur louant des véhicules à des tarifs préférentiels. Les bureaux centraux se trouvaient à Semarang, hors de la région du Merapi, mais l'une des destinations extérieures principales des sables et des blocs. Dans l'ensemble, obtenir des données chiffrées, précises sur ces groupes est une gageure, car il n'existe pas de bases de données complètes au comité de gestion gouvernemental, censé encadrer l'activité. Par ailleurs, beaucoup de groupes de Magelang ont disparu à la fin des années 2000, lorsque l'activité d'extraction s'est recentrée à Sleman. Dans ce district, le principal groupe qui existe est une association des travailleurs d'Umbulharjo, *desa* (commune) localisée sur le versant sud. Les personnes originaires de ce *desa* bénéficiaient, avant l'éruption de 2010, d'une réduction du prix d'accès aux sites d'extraction de la Gendol, et ne payaient que 3 000 Rp (0,25 €) au lieu de 7 500 Rp (0,7 €). Les conditions d'application de ce tarif préférentiel sont liées à la politique de Sleman, qui, depuis 2007, essaye de limiter l'accès des travailleurs ne résidant pas dans le district mais valorise les locaux (revue de presse, *KR*, 13 mars 2007).

Si à Sleman la gestion des péages était, à la fin des années 2000, gérée par le gouvernement du district, qui disposait de statistiques précises sur les rétributions perçues pendant plusieurs années, cela n'était pas du tout le cas à Magelang au plus fort de son activité, depuis le milieu des années 1990 jusqu'au milieu des années 2000. La plupart des rapports traitant de cette période font allusion au principal syndicat de travailleurs de Magelang, qui a profité des failles du système de gestion publique pour s'y immiscer, et outrepasser son rôle pour former un contre-pouvoir puissant au gouvernement du district. Cette association s'appelait *Paguyuban Pekerja dan Penambang Galian Golongan C Lereng Merapi Gotong Royong* – Communauté d'entraide des travailleurs des carrières du Merapi. Cette association comptait environ 4 300 membres en 2001 (Wiswakharman, 2001 ; Yachiyo, 2001), représentant essentiellement ceux qui remplissent les camions et y tassent le sable (manuellement ou bien à l'aide d'engins mécaniques). Ses effectifs importants, son organisation hiérarchique et bien structurée (attribution de cartes de membre personnelles) lui ont permis de jouer un rôle de lobbying puissant auprès du gouvernement local, mais aussi auprès des acheteurs de blocs et de sable (Pak Sudibyo, entretien, 2010). Par ailleurs, beaucoup des travailleurs membres de ce groupe n'ont pas

obtenu ni même demandé de permis officiel, et en profitent de cette protection pour échapper donc au contrôle étatique. Si l'APPI exigeait de ses membres qu'ils fussent officiellement déclarés, *Paguyuban Goro* réunissait tous ceux qui ne pouvaient ou ne voulaient demander un permis. Au début des années 2000, ce groupe est reconnu comme le syndicat majeur représentant les extractions de sable au Merapi, mais ses connivences avec la corruption liée à la politique et au monde des affaires ne l'ont pas mis à l'abri de dérives mafieuses (Pak Manis, entretien, 2010 ; Pak Sudradjat, entretien, 2010 ; Yachiyo, 2009). L'influence de *Paguyuban Goro* était prépondérante sur les sites d'extraction, depuis la division du travail pour les membres du groupe jusqu'à la fixation des prix et des salaires, sans concertation aucune avec les gouvernements censés officiellement encadrer l'activité (Figure 146). La rétribution des chauffeurs et des travailleurs a entraîné des alliances financières qu'il est impossible de quantifier ni même de caractériser entre *Paguyuban Goro* et le syndicat des chauffeurs *SPAISTAR* (Pak Sudibyo, entretien, 2010). Enfin, cette mainmise s'est étendue aux péages : la mafia a développé ses propres points de rétribution pour financer son activité, en parallèle de ceux déjà mis en œuvre par le gouvernement. Comme elle encadrait l'ensemble de l'activité d'un très grand nombre de travailleurs, rares sont ceux qui ne payaient pas. Dans ce cas, pour éviter de payer deux fois, certains refusaient de s'acquitter de la redevance gouvernementale, ce qui a été l'objet de nombreux conflits (Pak Purwanto, entretien 2008). La mafia de Magelang a disparu avec le tarissement progressif des sites, et ne semble pas avoir rayonné vers Sleman où, malgré des faiblesses structurelles, l'encadrement financier des péages était bien mieux organisé. Une structure mafieuse similaire n'a pas été retrouvée à Sleman avant l'éruption de 2010 (Mbak Yarni, Mas Sihadi, Mas Joko, Mas Ari, entretiens 2011).

2.2 La faillite de la gestion « top-down »

2.2.1 Les débuts de la législation

La législation des extractions s'est faite à l'échelle des gouvernements locaux. Aucun texte venu du pouvoir central n'harmonise de manière succincte l'ensemble des régulations décidées par les gouvernements locaux. À cette fragmentation temporelle s'ajoute une bien problématique fragmentation spatiale. L'ensemble de ces règles n'a pas été mis en œuvre de manière harmonieuse autour du volcan, chaque district ayant tenté de gérer les extractions sans chercher de concertation globale, au risque d'avoir des lois différentes de son voisin. Ce morcèlement géographique des régulations, suivant le découpage administratif, a rendu d'autant plus dure l'application de la loi.

Les matériaux volcanoclastiques sont pour la première fois reconnus en tant que ressources minérales de « catégorie C » (ressource minérale non stratégique, à la différence des hydrocarbures) dans le texte du règlement 27 de l'année 1980. Par rapport aux granulats de rivière qui proviennent des altérites tropicales et qui sont ramassés dans le Brantas (Java-Est), les sables volcanoclastiques fournissent une matière première peu altérée (cf. chap. 5), très demandée pour fabriquer un béton de qualité (cf. chap. 1) nécessaire au grand développement urbain qu'a connu l'Indonésie lors de cette période de croissance économique rapide. Toutefois, aucune régulation n'est mise en place avant le début des années 1990, et l'activité d'extraction demeure informelle, sans aucun encadrement ni aucun contrôle spécifiques. Il semblerait que le nombre de travailleurs et le rythme des creusements n'aient cessé d'augmenter durant les années 1980, compte tenu de la facilité d'acquisition de moyens mécaniques. L'industrie automobile japonaise a largement fourni le marché indonésien en véhicules de tous gabarits dès la fin des années 1970, et de plus en plus de personnes pouvaient louer un camion assez aisément.

De fait, des entreprises se constituent et acquièrent des bulldozers, des excavateurs et des pelleteuses, et les vallées du Merapi deviennent de plus en plus fréquentées et exploitées (Pak Anton, entretien, 2009). On peut en trouver certains indices dans la presse de l'époque, faisant référence à la ressource en sables et blocs pour les populations locales (revue de presse, *Suara Merdeka*, 2 février 1986), ainsi qu'au grand nombre de camions présents chaque jour (revue de presse, *KR*, 2 janvier 1987). Suite à cette intensification des extractions, l'activité auparavant traditionnelle et anecdotique ne peut plus être ignorée des responsables politiques, et en 1992 apparaissent les premiers efforts des gouvernements locaux pour tenter de l'encadrer. À Magelang, où se situe le cœur de l'activité, le gouvernement souhaite mieux contrôler les carrières (revue de presse, *Suara Merdeka*, 3 novembre 1992), puis surveiller les sites d'extraction mécanique en 1994 qui fleurissent en aval des principales rivières de l'ouest du volcan. À partir de 1995, apparaît le problème du déplacement en amont de l'activité : à mesure que s'épuisent les dépôts des talus médial et distal, de plus en plus de personnes n'hésitent plus à remonter vers le talus proximal du Merapi, là où l'exposition aux aléas éruptifs (flux pyroclastiques, notamment) est élevée.

2.2.2 Le permis de creuser : en théorie obligatoire, mais très peu demandé en pratique

Pour mieux encadrer les extractions, les gouvernements de Magelang et de Sleman décident, dès le début des années 1990, de contrôler l'accès aux fonds de vallée en louant des concessions d'espace et de durée limités aux particuliers qui souhaitent les exploiter. Ce règlement est adopté en 1996 à Boyolali, et en 2008 seulement à Klaten. Les travailleurs sont ainsi censés obtenir ce permis, nommé *Surat Izin Pertambangan Daerah* (Permis régional d'exploitation), ce qui n'est pas particulièrement suivi par les travailleurs. La loi 23 de 2001 du gouvernement de Magelang rappelle l'obligation d'obtenir ce permis, et en détaille de manière exhaustive l'ensemble des démarches administratives. Le permis peut être demandé par toute personne physique de nationalité indonésienne et domiciliée dans le district où est faite la demande. Dans le cas d'une entreprise, celle-ci doit être une entité juridique en conformité avec les dispositions de la législation en vigueur : son siège social doit être localisé en Indonésie, elle doit disposer d'un conseil d'administration indonésien et avoir une activité reconnue dans le domaine de l'exploitation minière (Pak Anton, entretien, 2009). Le SIPD est valable trois ans et peut-être renouvelé deux fois pour un an. Un particulier détenteur de SIPD a l'autorisation d'exploiter de un jusqu'à cinq ha, une entreprise jusqu'à dix ha (Pak Urip Bahagia, entretien, 2010 ; Pak Purwanto, entretien, 2010). Il demeure inféodé à une localisation précise : son possesseur n'est pas autorisé à changer de site comme bon lui semble.

Le permis est payant, et son tarif est calculé selon un certain nombre d'indices prévus par la loi : localisation demandée, technique d'extraction (manuelle ou mécanique), temps d'exploitation par jour. En fonction des cas de figure, le prix peut s'élever de quelques centaines de milliers de rupiahs (dizaines d'euros) à plus de dix millions (> 850 €) dans certains cas (Purwanto, 2007). À ceci s'ajoutent des frais complémentaires de 1,5 millions de rupiahs par ha. L'obtention du permis, toutefois, est longue, puisque l'ensemble des acteurs gouvernementaux en charge des extractions sont tenus de prendre part à l'examen des dossiers de demande (Figure 145). À Sleman, en 2008, des centaines de personnes attendaient depuis plus d'un an de recevoir leur SIPD (revue de presse, *Kompas*, 5 décembre 2008).

L'obtention du permis, malgré son aspect obligatoire, est donc très largement prohibitif, et peu de travailleurs l'ont demandé et obtenu dans les années 1990 et 2000 (revue de presse, *KR*, 15 août 2001), notamment à Sleman où seulement quatre licences ont été attribués en 2009 (Bureau des Mines de Sleman, 2010). On ne s'en étonnera pas : le prix du permis est bien trop élevé pour des personnes qui ne deviennent pas creuseurs par vocation, mais bien souvent contraintes par des situations

économiques locales difficiles. L'impossibilité de changer de site – notamment lorsque la ressource en sable arrive à épuisement – prévue par la législation du permis empêche les possesseurs d'un SIPD de pouvoir circuler et exploiter librement les vallées du volcan. Enfin, les gouvernements n'ont pas les moyens logistiques d'effectuer une surveillance complète de l'ensemble des sites d'extraction, ce qui limite forcément l'application de la loi (Figure 146).

2.2.3 Protéger l'environnement et assurer la sécurité sur les sites d'extraction

Dès 1992 apparaissent, dans la presse, des articles concernant les dégradations environnementales rapides dues aux extractions (voir *infra* IV, 2) : l'érosion rapide des dépôts est citée trois fois dans la presse en 1992 (revue de presse, *KR*, 10 février 1992 ; *Suara Karya*, 24 février 1992 ; *Suara Pamburuan*, 7 septembre 1992.). Le tarissement de la ressource dans les parties aval des rivières, mais aussi les risques d'affaissement de versants et l'accélération des processus d'élargissement de la vallée amènent le gouvernement de Magelang à interdire les extractions de nuit, mais aussi à tenter, sans succès, de clore le site de Jurangjero (Pak Sudibyo, entretien, 2008). Toutefois, la mesure principale de lutte contre les rythmes de plus en plus intenses d'extraction dans les années 1990 est l'interdiction des outils mécaniques à partir de 2001. Sleman reprend cette mesure et la décrète en 2002 (Pak Urip Bahagia, entretien, 2010). Malgré tout, l'application en demeure longue et difficile. En 2008, les pelleteuses avaient disparu de la Putih, mais certainement parce que les sites s'étaient tari, plutôt que par crainte de représailles. À Klaten, les pelleteuses étaient devenues rares en 2010, mais n'avaient pas totalement disparu. À Sleman, le gouvernement réussit à imposer l'interdiction des engins, d'abord par une surveillance accrue dans certains sites de la Boyong très fréquentés dans les années 2002-2004 (Pak Purwanto, entretien, 2010). Mais si la disparition des pelleteuses a été totale à Sleman dès la fin des années 2000, c'est aussi grâce à l'intervention du chaman du Merapi Mbah Maridjan, dont l'influence culturelle locale est élevée. En 2006, ce dernier s'est indigné contre les « blessures infligées à la montagne » par l'acier des excavateurs, et a appelé à leur abandon définitif (revue de presse, *KR*, 2 mars 2006).

La prohibition des outils mécaniques a toutefois son revers, notamment dans la Boyong. Au milieu des années 2000, cette vallée du sud du Merapi commençait à manquer de matériel de qualité, étant donné que l'essentiel des fractions sableuses des dépôts avait été évacué depuis le milieu des années 1990. Jusqu'en 2002, l'utilisation des pelleteuses permettait de pallier ce manque, en extrayant une quantité plus importante par jour de qualité médiocre ; mais dès lors que les rythmes de creusement se sont trouvés ralentis par l'abandon des outils mécaniques, l'exploitation des dépôts n'était plus rentable. Ainsi, les travailleurs ont décidé de s'attaquer aux parois subverticales de la partie amont de la vallée, où d'anciens dépôts d'origine volcanique pouvaient être creusés, ce qui fragilisa considérablement certains versants, et augmenta leur instabilité (revue de presse, *KR*, 20 avril 2005). En réaction à cette pratique, le gouvernement de Sleman décréta dès 2004 une série de consignes de sécurité, à la fois humaine mais aussi environnementale. Il était désormais strictement interdit de creuser dans les vallées à moins de 7 km du cratère ; il fallait également se tenir à plus de 20 m des berges, à plus de 300 m à l'amont des barrages à sédiments (*sabo dam*) et à plus de 500 m à l'aval (Pak Purwanto, entretien, 2010). L'amendement de 2007 réduisit encore les surfaces exploitables, puisqu'il était désormais interdit de creuser à moins de 6 km du cratère. À Magelang, interdiction était faite en 2001 de creuser à moins de 15 m des versants, et à moins de 100 m en amont et 50 m en aval d'un *sabo dam*. Dans tous les sites d'extraction parcourus avant l'éruption de 2010, aucun de ces règlements n'était respecté : à Jambu-Kaliadem, l'activité montait jusqu'à moins de 5 km du cratère. Dans le cas de la Boyong, où l'insuffisance de fractions fines dans le talweg forçait les travailleurs à entamer les versants, le gouvernement de Sleman décida de lever l'interdiction d'irriguer le fond de vallée pour l'exploitation agricole. La reconversion vers l'agriculture des populations

locales fut facilitée, excepté pour la partie amont de la Boyong à Turgo, où de petits lahars ont continué de s'écouler jusqu'en 2009.

Dans le cas des sites très fréquentés, où des coulées pyroclastiques suivies par des lahars fréquents renouvelaient régulièrement la ressource, les gouvernements locaux ont tenté de réguler l'accès aux vallées en saison humide. Déjà en 1996, le quotidien *Suara Merdeka* relatait les inquiétudes du district de Magelang face aux centaines de travailleurs allant chaque jour s'exposer aux lahars de la Putih (revue de presse, 29 octobre au 27 novembre 1996). Malgré ses peurs exposées dans la presse, le gouvernement ne fut pas capable de fermer tous les sites. De même, en 2008, le gouvernement de Klaten décida d'interdire l'accès aux sites d'extraction de la Woro pendant toute la durée de la saison des pluies (revue de presse, *KR*, 14 novembre 2008), sans succès. Pendant l'éruption de 2006, si les extractions se sont effectivement arrêtées à Sleman pendant quelques semaines, elles ont repris très vite dans la Woro, à peine un mois après la tragédie de Kaliadem qui coûta la vie à deux personnes tuées par une coulée pyroclastique (revue de presse, *KR*, 19 juillet 2006). Le gouvernement de Sleman rouvrit officiellement la Gendol aux extractions le 15 décembre 2006 (revue de presse, *KR*, 16 décembre 2006), mais l'amont de la vallée recouvert par plusieurs mètres de dépôts pyroclastiques était creusé chaque jour par plusieurs centaines de travailleurs depuis plusieurs jours déjà (revue de presse, *KR*, 23 novembre 2006). En 2010, plusieurs personnes se rendaient dans les vallées alors même que l'alerte n'était pas encore terminée, et que l'éruption continuait plus en amont (Franck Lavigne, comm. orale, 2010 ; Mbak Yarni, Mas Sihadi, Mas Joko, Mas Ari, entretiens 2011).

Dès 1992 apparaît dans la presse le terme « *penambangan liar* », que l'on peut traduire par « extractions sauvages », pour désigner les carrières creusées par des travailleurs qui ne détiennent pas de permis. La principale réaction des responsables gouvernementaux a été de fermer les sites illégaux, une mesure qui n'a presque jamais pu être menée à son terme, dans quelque district que ce soit. En 1992, le gouvernement de Magelang tente de fermer l'accès de Jurangjero, comme le titre le journal *Bernas* (27 janvier 1992). Cependant, dix ans plus tard, *Kompas* évoque « la difficulté des pouvoirs publics à fermer le site de Jurangjero » (23 mai 2002), un thème sur lequel le quotidien *KR* revient dans une série d'articles du 12 au 21 décembre 2009. On retrouve des exemples similaires à Klaten : à la fin du mois de juin 2009, le gouvernement ordonne l'abandon de l'ensemble des sites d'extraction, une mesure qui n'a absolument pas été suivie. Les seuls sites qui ferment sont ceux où la ressource, au fil des ans, s'est amoindrie et a fini par disparaître, comme sur la plupart des vallées de l'ouest au cours des années 2000. Dans le cas de la Krasak, par exemple, les extractions ont cessé d'elles-mêmes au début de l'année 2001, sans que le gouvernement de Sleman n'ait eu à intervenir.

Dans l'ensemble, les tentatives de contrôle des gouvernements locaux se sont presque toujours soldées par des échecs. Les fermetures de sites d'extraction n'ont jamais pu être menées à terme, à moins que les autorités ne s'appuient sur une force de police pouvant surveiller et punir de manière efficace les contrevenants.

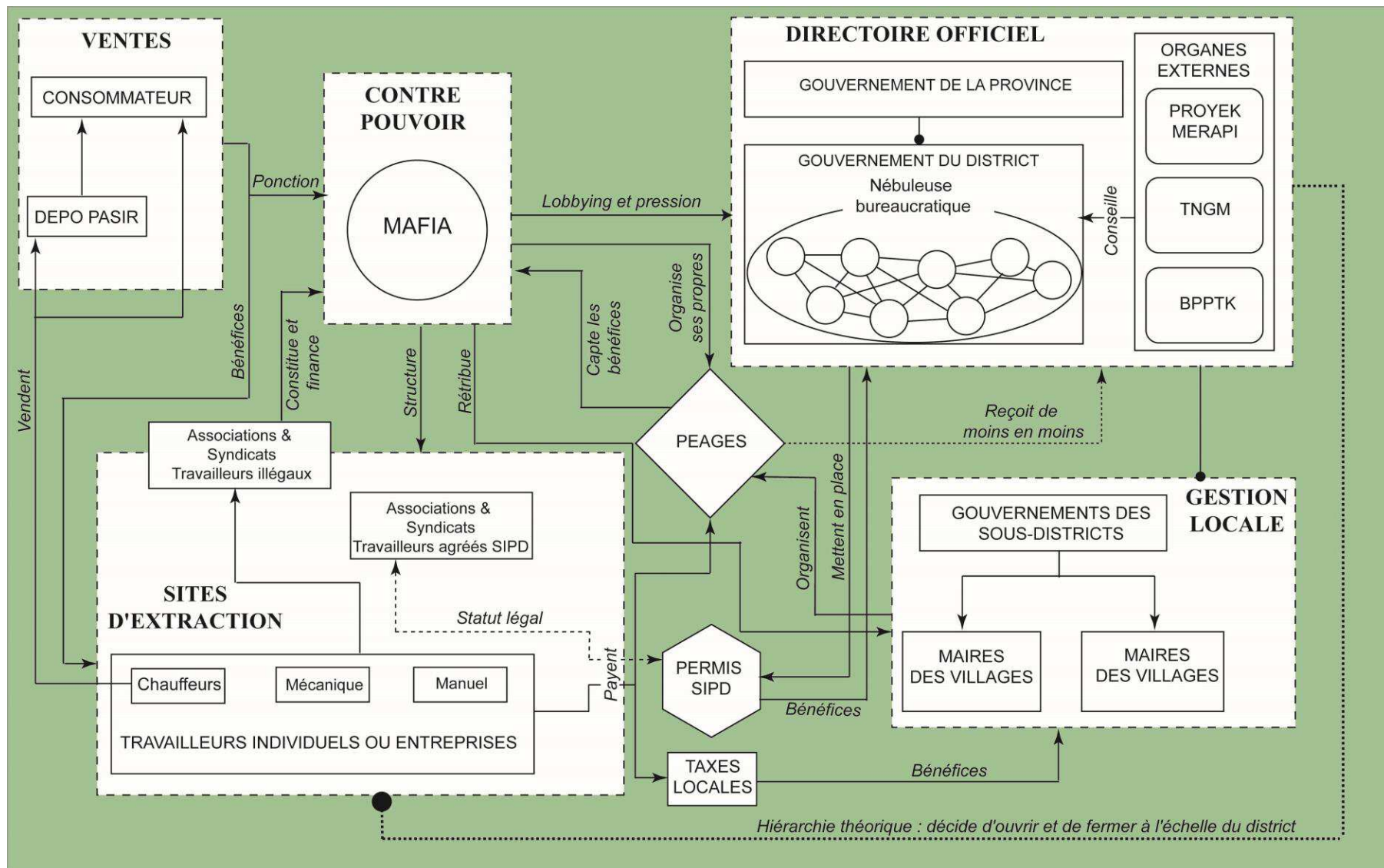


Figure 146 - Organigramme de l'encadrement des extractions de sable.
L'exemple du district de Magelang au début des années 2000, d'après des sources diverses.

L'ensemble de cet historique rapide des tentatives de législation des extractions dans les vallées du Merapi montre qu'il n'y a pas de gestion concertée sur l'ensemble du volcan, mais que chaque district décide ses lois indépendamment des autres, et que la plupart de ces règlements ne sont jamais appliqués par les populations concernées, principalement par manque de moyens de contrôle de la part des autorités. En outre, il n'y a pas de réelle anticipation de leur part : les règlements viennent, pour la plupart, *a posteriori*. Il n'y a pas eu de gestion *a priori* des flux de travailleurs et des rythmes de creusement, mais des tentatives de régulation tardives et inadaptées à l'ampleur incontrôlée qu'avait pris cette activité. Enfin, les gouvernements n'ont pas pris le temps de développer des outils de communication avec les travailleurs : les entretiens ont révélé que beaucoup d'entre eux ignoraient tout des lois en vigueur. Des médiations, des réunions, auraient pu être organisées pour limiter les défauts de cette gestion top-down inadaptée aux enjeux de cette activité. Une tentative de gestion communautaire des sites d'extraction a été amorcée à Magelang au début des années 2000 (Wiswakharman, 2001). Mais plutôt que d'une vraie tentative de *community-based management* qui aurait tenté de concilier l'aspect socio-économique de l'activité avec une nécessaire coordination gouvernementale, il s'agissait en réalité d'une méthode de gestion qui n'aurait pas laissé plus de pouvoir aux communautés locales. En revanche, la part belle était faite au rôle de *Paguyuban Goro*, mentionnée plusieurs fois en termes dithyrambiques comme étant la clé de voûte de l'activité, en taisant sa structure mafieuse.

L'extraction de matériel volcanique est une activité lucrative, et qui au cours des années 1990 et 2000 est apparue comme une solution à la crise de l'emploi dans les régions surpeuplées du centre de Java. Toutefois, face à l'intensification du nombre de travailleurs et des bénéfices récoltés, les gouvernements locaux se sont révélés incapables de la doter d'une structure légale et administrative solide. L'étude des différentes tentatives de législation très souvent infructueuses traduit la faillite d'une volonté d'encadrement top-down inadaptée aux caractéristiques intrinsèques de cette activité. Il ne s'agit pas d'une profession instituée à l'origine, mais d'une activité de secours, développée localement en fonction des disponibilités de la ressource. Trop longtemps les gouvernements locaux n'ont pas perçu cette dimension « vivrière » des extractions, et se sont heurtés à l'impossibilité d'imposer un permis de creusement pour réglementer les carrières. Si les entreprises peuvent l'acquérir, il n'en est pas de même pour des travailleurs isolés, non déclarés. Par ailleurs, la structure administrative, éclatée en une nébuleuse complexe d'organes plus ou moins rivaux, a empêché une gestion pertinente de l'activité. Ainsi, les gouvernements ont très vite été débordés et dans l'incapacité de réguler les rythmes des extractions. C'est pour combler ces failles béantes qu'un contre-pouvoir s'est affirmé sous la forme d'une structure mafieuse et aux ramifications tentaculaires. Pendant une dizaine d'années, cette mafia a plus ou moins réussi là où le gouvernement du district avait échoué : contrôler les travailleurs, les flux, les bénéfices (Figure 146). La diminution progressive des extractions sur le versant occidental, et la mise en œuvre du Parc National du Merapi (TNGM) ont amené le déclin de la mafia, et une reprise du pouvoir par les autorités officielles. Bien évidemment, cette gestion chaotique de l'activité a été le terreau d'une certaine instabilité dans son fonctionnement, attisant des conflits, et provoquant des abus dans l'exploitation, menant à des conflits délétères et à des dégradations environnementales parfois drastiques.

IV. Enjeux sociaux et environnementaux d'une activité informelle

1. Des conflits multiples

1.1 Institutions et populations locales

L'extraction de matériel volcanique apporte du travail à des milliers de personnes, et agit comme une soupape de sûreté dans un environnement où l'accès à la terre et à l'emploi sont problématiques. La faillite de la gestion top-down a montré combien les populations s'étaient approprié les espaces des vallées du Merapi. Toute ingérence de la part des institutions officielles chargées d'encadrer l'activité est mal perçue, et a pu provoquer quelques échauffourées. Le 12 juin 2004, alors que le gouvernement du district de Magelang s'apprêtait à fermer certaines routes entre la Bebeng et la Putih, endommagées par le passage des camions, de nombreux chauffeurs firent grève et organisèrent une opération escargot entre Yogyakarta et Magelang, sur la quatre voie (revue de presse, *KR*, 13 juin 2004). Durant l'été 2008, ce sont plusieurs dizaines de travailleurs qui se sont rendus devant les bureaux du gouvernement de Klaten pour exiger une clarification de la législation (revue de presse, *KR*, 26 juillet 2008). En effet, quelques semaines plus tôt, le district avait décidé de rendre obligatoire le permis d'exploitation SIPD. Mais en règle générale, ces révoltes contre les gouvernements régionaux ne sont pas monnaie courante : la plupart du temps, les lois contraignantes ne sont jamais appliquées.

Toutefois, la situation la plus problématique eut lieu en 2009, lors de la fermeture du site de Jurangjero, qui a déclenché un tollé parmi les communautés locales. Face aux moyens de surveillance déployés par le TNGM, les travailleurs furent contraints d'abandonner le site, mais cela ne se fit pas sans accroc (Figure 147). Le parc fut officiellement décidé en août 2002, et des polémiques sur l'extension géographique de la réserve naturelle fusèrent dès le mois de septembre 2002 (Pak Purwanto, entretien, 2010 ; Pak Manis, entretien, 2010). Dès le début de sa conception, ce parc était effectivement strictement incompatible avec toute idée d'exploitation des dépôts, notamment à cause de l'armada de camions associée à cette activité (revue de presse, *Kompas*, 15 août et 25 septembre 2002, *KR* 25 septembre 2002). Le parc fut ouvert en 2004, et exigea le départ des travailleurs, accusés de détériorer l'environnement. En effet, au milieu des années 2000, l'épuisement des ressources en sable dans la plupart des vallées occidentales du Merapi obligeait les travailleurs à se rapprocher du cratère et à franchir le périmètre interdit à toute activité humaine. Ils creusèrent les berges des vallées, au risque de provoquer des éboulements, menaçant aussi bien leur sécurité que les pins de la forêt occidentale, protégés par le Parc Naturel National du Merapi.

Afin de limiter les dégâts sur l'environnement, ce dernier décida à la fin de l'année 2009 de clore définitivement le site de Jurangjero, et réussit là où d'autres instances avaient échoué car il se dota d'une police capable de surveiller le site. Des entretiens informels sur le terrain avec d'anciens travailleurs et agents du Parc Naturel, associés à la revue de presse, ont permis de mieux saisir les enjeux de cette fermeture. S'appuyant sur une police environnementale composée d'agents du district (Polres, police du district) et d'une cinquantaine de soldats (Kodim, régiment du district), chargée d'effectuer des rondes de surveillance, le Parc Naturel a mis en œuvre des mesures de rétorsion particulièrement sévères pour les contrevenants. Ceux-ci, lorsqu'ils étaient surpris dans les carrières abandonnées, devaient s'acquitter de 10 ans de prison, ou bien d'une très lourde amende de cinq milliards de rupiahs (revue de presse, *KR*, 12 décembre 2009 et 25 janvier 2010). En quelques semaines, le site de Jurangjero s'était vidé. Certains articles de presse (*KR* des 10, 12 et 21 décembre

2009, puis du 26 janvier 2010) relatent l'incompréhension des populations situées en aval, à Sleman (sous-district de Turi) comme à Magelang (sous-district de Srumbung), où les travailleurs doivent faire face à des changements complets et très rapides de la réglementation en vigueur. Le problème est suffisamment important pour être bien représenté dans la presse (quatre articles de fond en quelques semaines), ce qui illustre la portée des enjeux des extractions autour du Merapi, activité informelle certes, mais réellement structurante pour les populations locales.

Et en effet, les conséquences sociales d'une telle mesure furent rudes pour les communautés locales, habituées à récolter un salaire maigre, mais néanmoins nécessaire. Fin 2009, l'ensemble des travailleurs de Jurangjero fut au chômage, et peinait à retrouver un emploi stable. Dans une région où la pression démographique est particulièrement élevée, ceux qui ne possèdent pas de terre ont de grandes difficultés à pouvoir se tourner vers l'agriculture en cas de besoin, et n'y trouveraient au mieux qu'un travail de saisonnier. Une telle mesure a augmenté le ressentiment des populations locales envers le Parc Naturel National (Figure 147), accusé « de leur confisquer leur moyen de subsistance » (revue de presse, *KR*, 21 décembre 2009). Cet exemple montre la portée des enjeux que soulève l'extraction des matériaux volcaniques depuis les dégâts occasionnés sur l'environnement jusqu'à la paupérisation des anciens travailleurs désormais sans ressources. En outre, la fermeture du site empêche les locaux de venir librement se servir du sable (entretiens informels). Même s'il était de mauvaise qualité, il permettait toujours la préparation d'un matériel de construction peu coûteux pour bâtir une annexe à une maison ou effectuer quelques réparations. En 2010, les locaux qui avaient besoin de sable durent en acheter (jusqu'à 100 000 Rp/m³). Cet achat représente presque dix fois plus que le salaire quotidien d'un agriculteur non propriétaire. Lorsqu'il s'avérait impossible pour les populations locales d'acheter du sable auparavant disponibles dans la Putih, la seule option restait de construire en bambou, qui a le désavantage de mal résister, sur le long terme, aux intempéries (entretiens informels).



Figure 147 - Insultes à l'égard des autorités

(PolHut : police des forêts, TNGM : parc naturel ; Sat Pol PP : police locale, appelés Asu : « chiens ») sur l'ancien péage du site de Jurangjero, site fermé de force en décembre 2009 (E. de Bélizal, mai 2010).

Le lourd prix social que payent les travailleurs qui ne peuvent plus accéder au site a même été un argument pour maintenir l'ouverture de certains sites à Boyolali. Le gouvernement du district souhaitait, à la fin de l'année 2008, clore officiellement les sites d'extraction de Cepogo, dont les carrières sont localisées sur un interfluve formé dans d'anciens dépôts volcanoclastiques. Les travailleurs déclarèrent qu'ils étaient prêts à abandonner l'activité à condition que le district finance intégralement la scolarisation⁸ de leurs enfants. Le gouvernement du district a finalement décidé de ne pas fermer le site (revue de presse, *KR*, 29 novembre 2008). En revanche, à la même époque, le district de Sleman comprit que la fermeture d'un site devait forcément amener certaines compensations matérielles pour les travailleurs, dont la reconversion vers d'autres professions s'avérerait difficile, et toujours à leurs dépens. À cause des éboulements répétés sur un site de la Boyong, où les travailleurs n'exploitaient plus guère que les versants, le gouvernement de Sleman décida de fermer le site en accélérant la reconversion vers l'agriculture. Pour que cette fermeture soit complète, il a été envisagé d'accorder aux travailleurs un emprunt financier pour leur permettre d'acheter du bétail (revue de presse, *Kompas*, 26 novembre 2008). Si aucune trace de cette décision n'a été retrouvée plus tard, cela dénote quand même une certaine prise de conscience de la part des gouvernements. Si la gestion de l'activité a échappé quasi-totalement à leur gestion top-down, c'est parce qu'elle a des enjeux sociaux essentiels qui doivent être pris en compte dans les politiques d'encadrement des sites.

1.2 Des conflits entre villageois

Outre certaines tensions entre les travailleurs et les gouvernements des districts, des conflits territoriaux ont pu naître également entre villages. À la fin des années 1990, deux vastes communes du district de Magelang, Ngablak et Ngargosuko, se disputaient la possession et l'exploitation de la « parcelle 36 », localisée sur la Putih (Sudibyo, 2002), nécessitant l'entremise de l'Office des Forêts, puis du TNGM qui a finalement récupéré le lopin conflictuel. Mais les enjeux de l'activité peuvent, parfois, causer des conflits dans les communes voire dans les villages eux-mêmes, notamment entre les agriculteurs et ceux qui exploitent les dépôts. Les mineurs, souvent, sont accusés d'endommager l'environnement, et sont forcément considérés responsables des problèmes de sécheresse et/ou de mauvaises récoltes, ainsi que du mauvais état des routes. Ils deviennent les « moutons noirs » de leur communauté (terme trouvé dans la revue de presse, *KR*, 19 juin 2000). Plusieurs agriculteurs ont ainsi déclaré avoir abandonné la rizière irriguée à cause de problème d'approvisionnement en eau durant la saison sèche, tandis que d'autres accusent les camions de soulever de la poussière et d'endommager leurs cultures (De Bélizal *et al.*, 2011). Enfin, des conflits plus graves ont opposé les partisans des extractions mécaniques à ceux qui travaillaient manuellement. Ces derniers accusaient les engins mécaniques de prélever trop de matériel à la fois, et donc d'accélérer le tarissement de la ressource dans les vallées où les lahars devenaient moins fréquents. Des épisodes violents ont même eu lieu en 1998 notamment, lorsque 13 pelleteuses ont été intentionnellement détruites par des travailleurs qui en condamnaient l'utilisation dans la Putih (Pak Sudibyo, entretien, 2008).

1.3 Des conflits d'influence

Concernant l'encadrement de l'activité, des conflits ont été fréquents au début des années 2000 entre le gouvernement du district de Magelang qui édictait des réglementations pour encadrer l'activité, et la mafia qui la structurait de fait. Le conflit, qui semble n'avoir jamais été officiel, se

⁸ En Indonésie, l'enseignement public est gratuit jusqu'au lycée. Toutefois, l'achat de livres, de fournitures et l'entretien de l'uniforme représentent un surcoût pour la plupart des familles.

crystallisait autour de la question des taxes et rétributions. L'organisation *Paguyuban Goro* avait mis en place ses propres péages sur les routes, doublés par des ponctions sur les bénéfices que les travailleurs devaient verser, soi-disant pour alimenter une caisse commune de solidarité. Naturellement, ces péages privés firent doublon avec ceux du gouvernement, et un certain nombre de chauffeurs refusèrent de payer les deux. Dans bien des cas, les travailleurs préféraient payer les rétributions de *Paguyuban Goro* plutôt que celles du gouvernement, l'association étant réputée plus attentive à la sécurité de l'emploi que le gouvernement. Au début des années 2000, Sudibyo (2002) estime que les sites d'extraction de Magelang étaient sous responsabilité de la mafia, et non plus sous celle du gouvernement, une opinion confirmée en 2010 par un responsable du Proyek Merapi (Pak Manis, entretien, 2010). Mais là où le bât blesse, c'est dans l'apparente inaction du gouvernement qui a laissé empiéter *Paguyuban Goro* sur ses propres prérogatives pendant presque dix ans, lui supprimant le contrôle d'une activité déjà ardue à encadrer. Cette mafia a entretenu des liens assez forts de lobbying et de pression envers le gouvernement, très certainement facilités par le versement obscur de pots-de-vin et de commissions sur les taxes perçues. Ainsi, pour s'assurer le soutien des administrations à l'échelle locale, *Paguyuban Goro* reversait une partie de ses bénéfices aux maires des villages. Dans le cas du sous-district de Srumbung, les maires recevaient une « aide » de la part de cette association. Ils reversaient 60% de cette somme au trésor du village, et conservaient les 40% restants pour leur propre usage (Pak Purwanto, entretien, 2010 ; Pak Manis, entretien, 2010 ; Pak Sudradjat, entretien, 2010). Les villages situés dans les parties amont des vallées recevaient environ 1 million de rupiahs par mois (soit 90 €), ceux situés juste en aval 700 000 rupiahs par mois (50 €), tandis que ceux localisés encore plus loin en aval avaient droit à 600 000 rupiahs (40 €). Nul doute qu'une telle pratique de corruption à peine déguisée a affirmé le rôle de *Paguyuban Goro* en tant que contre-pouvoir mafieux face à l'administration centrale du district de Magelang, écartelée entre organes externes et internes et morcelée en plusieurs entités difficiles à coordonner.

2. Conséquences environnementales

L'absence d'application de la loi a été à l'origine d'une certaine anarchie dans l'extraction des matériaux volcaniques, qui s'est faite à des rythmes parfois très rapides, dans certaines vallées, à l'aide d'engins mécaniques lourds. Certains travaux universitaires et certains rapports de bureaux d'étude évoquent les profonds impacts environnementaux de l'exploitation intense des dépôts volcaniques. Abasi, 1996 ; Hutomo, 1997 ; Sudibyo, 2002 ; Sigma Tiga, 2007 ; Purwanto, 2007 ; Yachiyo 2001 et 2009 : ces sources ont servi de base à l'étude de terrain ayant eu pour objectif l'évolution de ces impacts dans le temps.

2.1 Ressource en eau et environnement : des enjeux supposés mais méconnus

Les dépôts volcanoclastiques au Merapi sont perméables, même consolidés en tufs ou en brèches. Après d'intenses précipitations, les dépôts, poreux, absorbent l'eau et la transmettent aux couches sous-jacentes. Dans les corridors de lahars, l'eau peut s'écouler dans les nappes alluviales du talus proximal fréquemment recouvert par les dépôts. L'écoulement de surface y est temporaire, et n'apparaît pendant les pluies que sur les surfaces tassées par les camions où la perméabilité est *de facto* réduite. Quant au cours pérenne, il ne draine en permanence que les parties médiale et distale des vallées, là où les dépôts sont moins épais. Ceux-ci jouent ainsi un rôle dans l'infiltration de l'eau, et participent à la recharge des aquifères (Abasi, 2006).

L'exploitation de ces dépôts aurait des impacts conséquents sur ce fonctionnement hydrologique, et alimente des tensions depuis les années 1990. Bien que les grandes périodes de sécheresse soient plutôt liées aux années El-Niño (1997 ou 2004, notamment), cela n'explique pas la disparition permanente de certaines sources relatées par les agriculteurs (revue de presse, *KR*, 22 mai 2004). L'incision artificielle de dépôts volcaniques tend en effet à modifier les paramètres hydrologiques des bassins versants, ce qui réduit l'infiltration et l'augmentation du ruissellement de l'eau. L'infiltration est réduite pour deux raisons principales : d'abord des changements artificiels dans la distribution granulométrique des dépôts, dont les sables sont systématiquement retirés, ensuite, le compactage des dépôts à cause du passage incessant des camions dont les conséquences sont durables (Figure 148). Ainsi, la circulation des eaux souterraines est profondément perturbée par l'extraction de sable, comme cela a pu être mesuré ailleurs (Petit *et al.*, 1995 ; Mas-Pla *et al.*, 1999). Les conséquences de ce manque d'approvisionnement en eau menacent principalement les habitudes agricoles : certains champs de riz le long des vallées, sur le flanc ouest du Merapi (région de Talun) ont été progressivement transformés en cultures sèches produisant tomates, piment, ou arachides, en raison de la réduction drastique de l'approvisionnement en eau par irrigation. Ces modifications de l'environnement contraignent les agriculteurs à acheter ce qu'ils pouvaient auparavant produire eux-mêmes.



Figure 148 - Talweg de la Putih dans un ancien site d'extraction de la Putih en aval de Jurangjero, abandonné dans les années 2000. On remarque que l'écoulement pérenne suit son cours dans les traces laissées par le passage des camions lorsque le site était exploité (E. de Bélizal, mai 2010)

Les extractions sont également responsables de dommages sur la faune et la flore, ce qui a été à l'origine de la fermeture des sites d'extraction situés dans le TNGM. Sudibyo (2002) estimait que 230 ha avaient été dégradés dans la forêt de pins sur les hauts versants occidentaux du Merapi, soit près de 10% de la superficie totale de cette forêt. Le rapport Sigma Tiga (2007) dénonce l'activité d'extraction à Cepogo (district de Boyolali) comme la principale responsable de disparition des macaques. Purwanto (entretien, 2010) évoquait de profondes perturbations dans la structure des sols, dont les horizons organiques superficiels avaient tendance à s'appauvrir dans le cas des carrières creusées sur interfluves ou dans les versants (Figure 149). Il est évident qu'une activité qui a pu être si intense, qui a utilisé des engins mécaniques, ait eu des impacts néfastes sur les systèmes biophysiques du Merapi. Dans les fonds de vallée, les fractions de matériel qui n'intéressent pas les creuseurs (gros graviers, cailloux et blocs) sont amassés en terrils coniques (cf. supra, I.1.1). D'après Purwanto (2007), ils rendent difficile les processus de revégétalisation dans les vallées qui ne sont pas exploitées. L'absence des fractions fines ralentit la formation du sol (Purwanto, 2007). Dans beaucoup de vallées qui n'étaient plus exploitées par les carrières avant l'éruption de 2010, des trous et des *banthak* continuaient de marquer des espaces dévolus à l'agriculture depuis plusieurs années (Figure 149A et D).

Cependant, si de nombreuses études universitaires et rapports de bureaux d'étude les dénoncent, aucun ne propose de mesures approfondies. Presque tous, par exemple, se désolent de voir que la ressource en eau diminue vraisemblablement à cause des extractions, mais personne ne propose une argumentation étayée d'exemples hydrologiques chiffrés : pas de mesures des variations de débits des cours d'eau, pas d'études piézométriques des hauteurs d'eau dans les puits.

Le Bureau des Mines de Sleman, en charge également de l'hydrologie, ne disposait pas en 2010 de base de données actualisée sur les sources de son district. Les débits disponibles pour chaque source ne sont pas des moyennes sur plusieurs années, mais deux mesures ponctuelles, l'une faite en saison humide et l'autre pendant la saison sèche. Il n'est donc pas possible d'estimer de manière objective des tendances d'évolution nettes et des variations sur plusieurs années de la ressource en eau, puisque les chiffres donnés en 2010 sont les mêmes que ceux obtenus deux ans plus tôt : aucune nouvelle campagne de mesures systématiques n'avait été faite depuis.



Figure 149 – Des marques durables dans le paysage

A : anciennes carrières dans la Putih à Srumbung ; B : Le fond de vallée de la Putih à Jurangjero
C : Banthak et bloc de brèche volcanoclastique dans le fond de vallée de la Senowo ; D : Terrasses entaillées par l'extraction dans la Senowo
(cliché E. de Bélizal, mai 2010)

2.2 Une sensibilité accrue aux processus d'érosion : l'exemple de Deles (Klaten)

Les extractions faites dans les dépôts volcaniques quaternaires qui forment les interfluves ont des conséquences particulièrement spectaculaires. Dans le cas de la Woro, les photos aériennes de la mission ULM de 2010 montrent des impacts géomorphologiques causés par des creusements excessifs réalisés dans des carrières situées à proximité. Deles est l'un des sites d'extraction les plus intensifs de la région de Klaten, situé juste en arrière de la paroi orientale de la Woro, sur l'interfluve. Ancien terrain de camping verdoyant vanté pour son point de vue imprenable sur le cône du Merapi au début des années 1990 (Cholik, comm. orale, 2010), Deles apparaît aujourd'hui dévasté. Une désolation de champ de bataille imprègne ce site d'extraction qui a entièrement remodelé la topographie locale, produisant un paysage lunaire, stérile et surtout très instable, comme le montrent les observations et mesures de terrain réalisées en 2010 et 2011.

La profondeur de certaines carrières traduit l'intensité des rythmes de creusement, qui, en une quinzaine d'années, a parsemé le sol de trous d'une profondeur supérieure à 7 m. Des talus raides surplombent ces cavités, tandis que d'autres en pentes concaves plus douces apparaissent intensément ravinés par les pluies de mousson qui tombent sur ces sols creusés, mis à nu, et tassés par le passage des poids lourds et des chenilles de pelleteuses. Les chemins sont parsemés de blocs qui se sont éboulés des talus, ou bien de petits cônes d'accumulation formés de particules transportées dans les ravines par le ruissellement abondant en temps de pluie. En outre, de très nombreuses traces de réseaux d'écoulement temporaires peuvent y être repérées, et témoignent de l'érosion très active de cette partie de l'interfluve proche du versant. Ce dernier s'affaisse dans le fond de vallée de la Woro en un processus rapide d'érosion régressive, qui est provoquée par un double mécanisme d'éboulements (on peut remarquer des tabliers d'éboulis associant des dépôts altérés à matrice argileuse et des blocs) et de ravinements, lesquels lui donnent par endroit un aspect très disséqué (Figure 150). Les têtes des ravines les plus importantes taillées dans le versant sont connectées à celles formées dans les carrières de Deles, réactivées à chaque pluie. L'écoulement qui se crée alors dans le site d'extraction emprunte et surcreuse ces ravines, en arrachant puis transportant du matériel. De petites coulées boueuses naissent ainsi sur les talus puis parcourent le réseau formé par les chemins d'exploitation avant de se déverser dans la Woro en incisant les ravines du versant oriental. À cause de ce système de ravines se crée alors un vaste cône d'accumulation dans le fond de vallée d'une largeur maximale de 47 m, à progradation rapide, nourri à la fois par l'érosion sur le site de Deles, combinée à celle du versant de la vallée (Figure 150). Le faciès des dépôts montre un matériel brunâtre, altéré, à granoclassement inverse : un premier cône d'accumulation, formé par l'extension des débris les plus fins a été ensuite recouvert par un second cône composé de débris plus grossiers, dont le lobe distal a été évacué par l'écoulement pérenne du corridor de lahars de la Woro. Le cône d'accumulation, tronqué, forme un micro-talus d'une vingtaine de cm de commandement sur le talweg. Au pied des ravines, de petits cônes de débris de 4 à 8 m de largeur maximale se forment, avec accumulation des matériaux les plus gros au centre d'un éventail composé du matériel fin qui prograde plus loin (Figure 150).

Les observations de terrain de 2011 sur ce site, faites un an exactement après les premières mesures et la prise de l'image aérienne, montre un système d'érosion toujours actif. Si le système secondaire des ravines creusées sur les glissements s'est végétalisé, les ravinements du versant reliés à ceux du site d'extraction se sont intensifiés. La ravine principale s'est élargie de 3 m, et s'est encaissée de plus de 1,5 m. Le cône d'accumulation repéré en 2010 a été recouvert de 2 m par les dépôts des lahars survenus après l'éruption de 2010. Un nouveau lobe s'est formé dessus, et certains écoulements boueux particulièrement puissants les ont même incisé puis tranché en y ouvrant une brèche de 2,1 m de largeur. L'érosion régressive du versant oriental de la Woro à Deles continue à un rythme rapide (Figure 151).

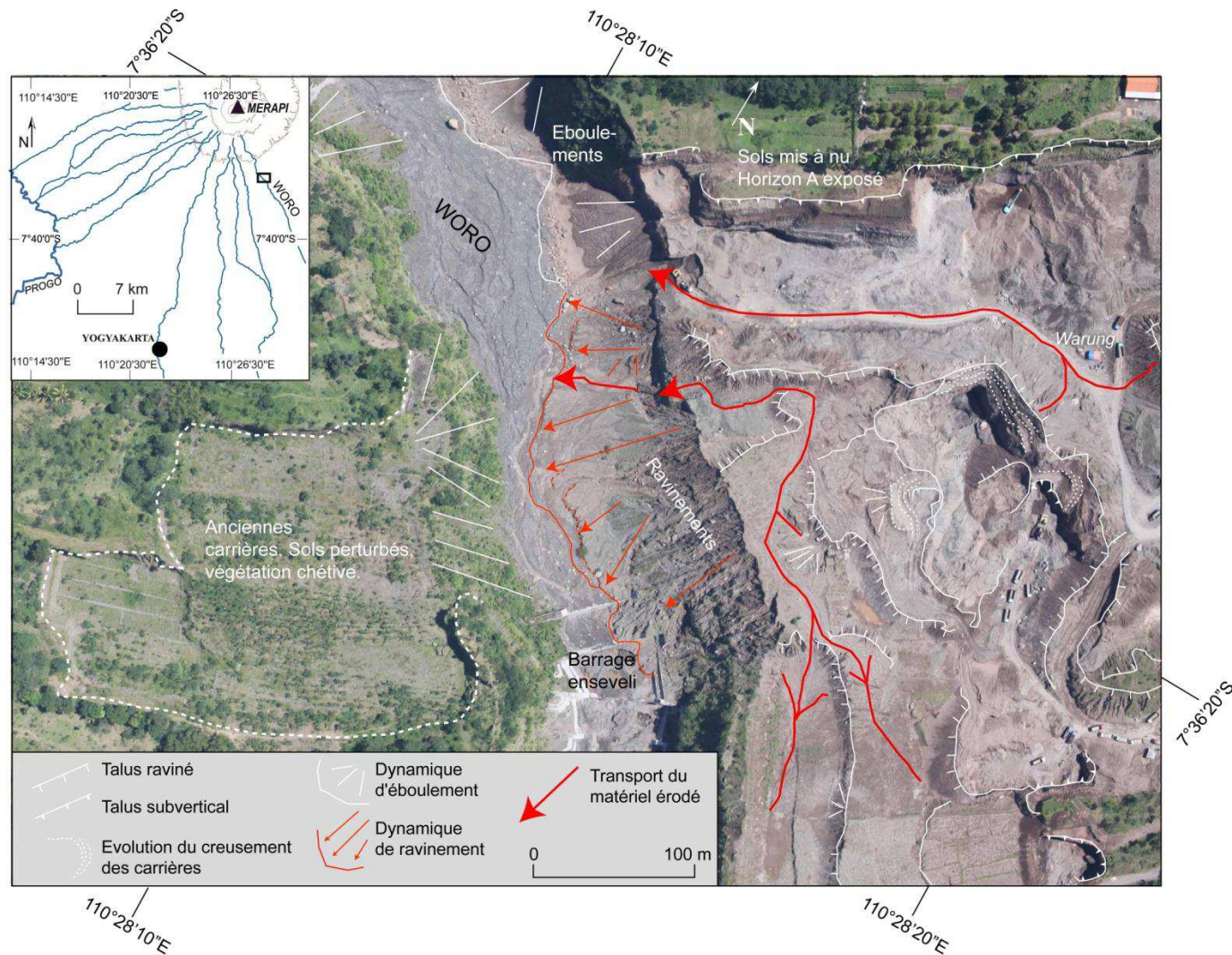


Figure 150 - Perturbation des dynamiques d'érosion sur le versant est de la Woro
(photo aérienne : extraite de la mission ULM de septembre 2010 ; photos au sol : E. de Bélizal, juillet 2010)



Figure 151 – Le versant oriental de la Woro en mai 2011 (cliché E. de Bélizal, mai 2011)

Les carrières de Deles modifient profondément, à l'échelle locale, la topographie de l'interfluve et contribuent à l'élargissement de la vallée par déstabilisation de la paroi orientale, mais non pas par le sapement basal de la berge. La mise à nu des sols sur l'interfluve perturbe les processus d'infiltration des eaux de pluies, et provoque en temps de pluie un ruissellement qui redistribue un matériel sensible à l'érosion dans la vallée. Une partie entière de l'interfluve et du versant disparaît ainsi, rapidement étalée vers le fond de vallée. Cette déstabilisation morphologique a alerté les autorités qui n'attribuent plus de permis pour creuser à Deles, et qui en surveillent, depuis 2009, la fréquentation, laquelle demeure assez élevée : 17 camions peuvent être dénombrés à l'heure de la prise d'image. En outre, des pelleteuses ont toujours accès au site : trois peuvent être distinguées sur la photo aérienne. Le biotope local a été entièrement détruit, et la reconstitution des sols risque d'être longue. La Figure 150 montre, sur le versant ouest de la Woro, une ancienne concession aujourd'hui abandonnée. On remarque qu'elle est inscrite dans une légère dépression, provoquée par les creusements. On y retrouve également une morphologie similaire de transport de matériel depuis les carrières vers la vallée, avec déversement en forme de cône d'accumulation sur le versant jusque dans le talweg. Il s'agit d'un site qui a bénéficié, depuis 2006, des efforts du district pour réparer les anciennes carrières. Toutefois, les cicatrices de son ancienne exploitation demeurent visibles : la végétation apparaît chétive et peu couvrante, il s'agit de broussailles graciles et de touffes d'herbes adaptées à des sols pauvres. Ces derniers semblent effectivement peu épais, et ne recouvrent pas l'ensemble de la parcelle, où affleurent encore souvent des formations sableuses héritées des creusements passés.

2.3 Les dommages sur les infrastructures

Les extractions de dépôts volcaniques dans les vallées peuvent menacer aussi les infrastructures, à commencer par les barrages dans les rivières. Les dégradations multiples sur l'ensemble du Merapi, répétées d'années en années, sont à l'origine d'un véritable gouffre financier pour le Proyek Merapi et pour le Balai Sabo (Pak Sudradjat, entretien, 2010) en charge de la construction et de l'entretien de ces barrages. Les ingénieurs de ce bureau déclarent avoir perdu de centaines de millions de rupiahs dépensées pour l'entretien des infrastructures de protection anti-lahar, perpétuellement endommagées par les carrières, en dépit de la législation.

Les routes sont également très dégradées, d'autant que les camions sont en surpoids : les *colts diesels* étaient pleins à ras-bord lors des comptages effectués en 2010 dans la Gendol. D'après la presse et les observations de terrain des dizaines de kilomètres de routes étaient endommagées avant l'éruption de 2010, ce qui a poussé certains maires à fermer leur commune au passage de camions. On trouve des routes particulièrement endommagées à proximité des grands bassins d'extraction, notamment Jambu-Kaliadem (Figure 152). Les exemples représentés en Figure 152 appartiennent aux catégories D3 et C3 de la grille d'évaluation de qualité des routes du Merapi établie par E. Mei dans sa thèse de doctorat (en cours de réalisation ; voir Mei *et al.*, sous presse). Il s'agit des types les plus dégradés, dont l'usure est causée par le passage répété de camions alourdis par les sables du Merapi.



Figure 152 - Routes endommagées au débouché de la voie d'accès orientale de Jambu-Kaliadem.

A : revêtement disparu et nids-de-poule, type D3 d'après Mei *et al.* (sous presse) ; B : asphalté en cours de disparition, type C3 (Mei *et al.*, sous presse). La circulation est dangereuse, particulièrement en période de mousson, et risque de retarder les procédures d'évacuation en situation d'urgence.

Clichés E. de Bélizal, mai 2010.

En 2004, après un pic de fréquentation dans la Putih à l'ouest du Merapi, la circulation sur quatre-voie Semarang- Yogyakarta devenait dangereuse à cause du trafic incessant de camions. Le gouvernement du district a donc décidé de lancer un projet de construction d'une voie spéciale pour

les camions qui aurait circulé parallèlement à la nationale. L'embranchement se serait fait au niveau de Mungkid, et aurait permis d'alléger le trafic dans la ville de Muntilan. Toutefois, l'entreprise en charge était malaisienne, et devait utiliser un asphalte originaire de Malaysia, réputé de meilleure qualité que celui utilisé en Indonésie (revue de presse, *KR*, 18 février 2004). Le chantier a démarré en avril 2004, mais s'est interrompu un an plus tard, compte tenu de la réduction des dépôts à l'ouest du Merapi et de la baisse d'activité. L'entretien des routes est un enjeu primordial, profitant aux communautés sous tous les points de vue, aussi bien celui de l'activité d'extraction (qui dépend très largement des camions et des routes) qu'en cas d'urgence lorsqu'il faut évacuer les zones exposées au plus vite.

2.4 Des sites à risque

Une première page du quotidien *Kedaulatan Rakyat* (KR) du 8 août 1998 titrait, après une éruption du Merapi : « Jalan Tol lahar Merapi : berbahaya ! » (une autoroute de lahars au Merapi : danger !). La revue de presse permet de prendre la mesure des conditions de travail dangereuses dans les carrières, immédiatement exposées aux coulées pyroclastiques et aux lahars qui, s'ils apportent la ressource, sont également des aléas à ne pas négliger. L'étude des coupures de presse a permis d'établir la fréquence des incidents (dommages sans victimes) et des accidents (dommages avec victimes) dus aux aléas volcaniques sur les sites d'extraction du Merapi depuis 1987. Il s'agit de la seule source d'information concernant les dommages dus à cette activité ; en l'occurrence, ces chiffres doivent être plus considérés comme des estimations que comme des valeurs exactes.

On distingue deux grands types d'événements (Tableau 35) : les blessures ou décès de personnes, et les pertes de camions, entraînés par des lahars. Dans le premier cas, les accidents, les travailleurs sont le plus souvent ensevelis par les éboulements ou glissements de versants, aux déclenchements desquels ils contribuent largement. Quant aux incidents, ils concernent les pertes de matériel, notamment les camions emportés par des lahars (Figure 153). La forte fréquence d'occurrence des lahars en saison des pluies rend ce type d'incident quasi-banal sur les sites très fréquentés comme la Gendol. Lors du retentissement de la sirène d'alarme présente à Jambu, l'ensemble des véhicules se dirige ensemble vers la sortie du site, sur des chemins cahoteux, à moins de 15 km/h. Il est donc inévitable que la coulée boueuse déclenchée moins de 5 km en amont ne les rattrape. Dans la quasi-totalité des cas, cependant, les chauffeurs et travailleurs ont toujours pu s'abriter à temps.

Tableau 35 - Accidents et incidents dans les vallées du Merapi : bilan de 2010 (De Bélizal *et al.*, 2011)

Accidents 1987-2010	Incidents (dégâts matériels) 1987-2010
118 personnes tuées	131 camions emportés par des lahars

L'activité d'extraction est une activité dangereuse compte tenu des importantes pertes subies, par exposition des personnes à des aléas fréquents. Les travailleurs remontent toujours plus en amont dans les vallées pour trouver du sable, en dépit des risques liés aux aléas volcaniques, et ils creusent les versants au risque de les faire s'effondrer. Malgré tout, la seule exposition n'explique pas à elle-seule la vulnérabilité et les risques dans ces espaces si particuliers que sont les carrières dans les vallées du Merapi. L'éruption de 2010 et ses nombreux lahars postéruptifs ont donné l'opportunité de mener plus avant des investigations sur la question des risques dans les vallées du Merapi, présentées dans le chapitre suivant.



Figure 153 - Camion emporté par un lahar dans la Boyong (cliché F. Lavigne, 1995)

Activité informelle, les extractions de sables et de blocs dans les vallées du Merapi ont pu se développer librement et quasiment sans contraintes. Bien loin d'être une activité anecdotique, les sites d'extraction du Merapi ont acquis un rôle essentiel dans la géographie du volcan. Autour d'eux se cristallisent des enjeux sociaux conflictuels et des luttes d'influence. Également, l'intensité et les pratiques d'exploitation ont contribué à modeler artificiellement les formes du relief. Des études dénoncent des conséquences graves sur l'infiltration de l'eau : la recharge des aquifères serait réduite, et des sources disparaîtraient. Il est vrai que les marques environnementales des extractions sont durables : les trous dans les dépôts et les terrils de matériaux rejetés par les mineurs en sont des stigmates dans les corridors de lahars. L'exemple du site d'extraction de Deles montre également que les conséquences sur l'érosion sont spectaculaires, et soulèvent de graves questions sur l'érosion des sols. Enfin, le trafic incessant des poids lourds provoque la rapide dégradation des routes tout autour du volcan, menaçant la vie quotidienne des populations locales, aussi bien que leur évacuation en cas d'éruption.

L'objectif de ce chapitre 6 était de présenter les caractéristiques générales des extractions dans les dépôts volcanoclastiques des vallées radiales du Merapi. Après avoir expliqué le fonctionnement global des carrières qui forment un site d'extraction, l'évolution spatio-temporelle de l'activité a été présentée. À partir de volumes estimés d'après les données de fréquentation disponibles dans les archives publiques et dans des mémoires universitaires, les constructions et recompositions successives des flux et des réseaux depuis les années 1990 ont pu être reconstituées. L'analyse rétrospective a également soulevé le problème de l'impossible gestion de cette activité qui est demeurée informelle. Les bénéfices conséquents qu'elle a engendrés et l'éclatement des administrations de districts ont favorisé l'émergence, à l'ouest du Merapi, d'une structure mafieuse qui a confisqué, jusqu'aux années 2000, le contrôle de l'activité en s'affirmant comme un contre-pouvoir puissant. Cette mafia a perdu de l'influence lorsque le centre de l'activité s'est déplacé vers le sud du volcan, autour de la Gendol. Enfin, pour mieux démontrer l'importance que prennent les extractions dans la géographie du Merapi, leurs enjeux sociaux et environnementaux ont été expliqués, à l'aide de données secondaires et de données primaires d'analyse de terrain et de photo-interprétation.

Tout au long des deux dernières décennies, les dépôts volcanoclastiques sont devenus une ressource dont l'exploitation s'est révélée riche de conséquences politiques, économiques, sociales et environnementales. Le propos du chapitre suivant a pour objectif de montrer et de discuter les nouveaux enjeux des sites d'extraction suite à l'éruption de 2010, notamment la mise en danger assumée de travailleurs encore plus nombreux, volontairement exposés à des aléas plus fréquents qu'auparavant.

Chapitre 7 – Les sites d'extraction après l'éruption de 2010 : permanences, mutations, et risques

L'éruption d'octobre- novembre 2010 a eu des conséquences qui jouent sur plusieurs échelles spatiales et temporelles autour du Merapi. Les coulées et déferlantes pyroclastiques ont atteint des proportions peu communes, notamment dans la vallée Gendol, où elles se sont étendues jusqu'à 17 km sur le talus distal du volcan (Surono *et al.*, sous presse ; Komorowski *et al.*, sous presse). Au total, l'éruption a éjecté entre 0,03 et 0,06 km³ de matériel pyroclastique qui a immédiatement représenté un stock important de matériel instable prêt à être mobilisé par les eaux de la mousson durant les années à venir. Comme l'ensemble des bassins-versants du nord-ouest, de l'ouest et du sud du Merapi a été recouvert par ces dépôts, les lahars se sont simultanément déclenchés sur les versants occidental et méridional du volcan (voir partie 2). Ce phénomène peu fréquent a été à l'origine d'une très rapide redistribution de la localisation des sites d'extraction autour du Merapi. Durant la mousson 2010-2011, une nouvelle géographie de la ressource en matériaux volcanoclastiques s'est dessinée dans les vallées du Merapi, avec de nouveaux espaces dynamiques sur le versant sud dominés par l'émergence d'un pôle majeur toujours dans la Gendol, mais désormais plus en aval qu'auparavant. Les sites du versant ouest connaissent un regain d'activité, mais sans toutefois retrouver le dynamisme du début des années 2000. De nouveaux sites ont été créés, d'autres abandonnés depuis longtemps ont été rouverts, et quelques-uns ne sont plus exploités. L'objectif de ce chapitre est d'abord de s'intéresser aux permanences et mutations de l'activité d'extraction dans les vallées du Merapi après l'occurrence d'une éruption majeure, pour mieux saisir le fonctionnement spatiale des corridors de lahars exploités.

Ce contexte post-éruptif marqué par une forte récurrence des lahars rend particulièrement pertinente et nécessaire la question des risques encourus dans les sites d'extraction dont le fonctionnement a été exposé au chapitre précédent. Les résultats présentés et discutés ici sont issus pour la plupart d'observations de terrain et d'une enquête par questionnaire systématique effectuée en juin 2011. Le traitement statistique du questionnaire a permis d'établir, en lien avec de longues observations de terrain concernant le fonctionnement des sites d'extraction, une grille d'évaluation des risques pour en comprendre l'origine et tenter d'en donner une valeur quantifiée aboutissant à un classement. Des seuils et des valeurs de vulnérabilité et d'enjeu ont été définis puis, associés à la fréquence d'occurrence de l'aléa « lahar » dans chaque rivière, ont donné une valeur de risque pour chaque site. Au final, une typologie a pu être construite en fonction de l'importance et des combinaisons des différents facteurs de danger sur chaque site d'enquête. Ce chapitre ouvre ainsi la voie à une géographie des risques liés aux lahars du Merapi plus complète, intégrant des espaces jusqu'ici négligés en dépit de leur importance dans le fonctionnement social et économique du volcan.

I. Répartition des sites d'extraction après l'éruption de 2010

Une grande partie des travaux de terrains menés en 2011 a eu pour objectif le renouvellement des données concernant les sites d'extraction dans les vallées du Merapi. Afin d'en apprécier les adaptations sur un temps très court (quelques mois), les études de terrain ont été menées en trois étapes successives : repérage des sites d'extraction, mesures de fréquentation par jour (travailleurs et camions), puis enquête par questionnaire systématique (voir chap. 2).

1. Une nouvelle répartition spatiale

Après l'éruption de 2010, les lahars se sont produits sur l'ensemble des versants occidentaux et méridionaux, et ont atteint le talus distal du volcan, avec pour effet principal de remettre entièrement en question la répartition spatiale des sites d'extraction dans les vallées du volcan. L'évolution de cette répartition avant et après l'éruption permet de distinguer quatre types fondamentaux.

1.1 Les nouveaux sites

Il s'agit de portions de vallées où aucune activité d'extraction n'a été relevée dans un passé récent (années 1980-1990). Les cinq sites qui répondent à ce critère sont localisés dans les corridors de lahars formés ou reformés après l'éruption de 2010 (Figure 154) : dans les parties distales de la Putih (commune de Jumoyo jusqu'à Sirahan), Gendol (Jambon et le confluent entre la Opak et la Gendol au sud de la commune Sindumartani) et Woro (Sukorini), ainsi que dans la partie médiale de la Kuning. Ces sites étaient auparavant dédiés à l'agriculture, mise en place dans les fonds de vallée sur des dépôts anciens, drainés en permanence, où l'occurrence des lahars a été quasi-nulle pendant au moins deux générations.

1.2 Les sites réhabilités

Il s'agit du cas de figure le plus représentatif des sites d'extraction autour du Merapi, et représente onze sites (Figure 154). Cette classe regroupe les portions de vallée qui avaient connu une exploitation plus ou moins abondante depuis les années 1990, avant que les dépôts volcanoclastiques ne vinssent à y manquer suite à la diminution des occurrences de lahars. Ce sont des sites d'extraction aménagés dans les parties médiales de la plupart des vallées radiales du volcan, traversées par des lahars plus ou moins fréquents. Il s'agit d'abord de l'ensemble des rivières de l'ouest du Merapi, où l'activité d'extraction a périclité au début ou au milieu des années 2000 (voir chap. 6), remplacée peu à peu par l'agriculture (rizières irriguées, cresson, arbres fruitiers). Les rivières Trising, Senowo, Pabelan, Lamat, Blongkeng, Putih (commune de Srumbung), Bebeng (commune de Sudimoro) et Krasak (Pondokrejo) sont ainsi de nouveau le théâtre d'une activité d'extraction un temps abandonnée. Pour le flanc sud du Merapi, il s'agit de deux sites sur le corridor médial de la Boyong (Kemiri et Kemiricilik), qui s'étaient tournés vers l'agriculture après l'amenuisement de la fréquence des lahars, ainsi que de l'amont de la Kuning (Dam Kuning). La fréquentation de ces sites est inégale, et reste d'une certaine manière – mais ce n'est pas la seule explication – liée à la fréquence d'occurrence des lahars ; ceux-ci étant peu fréquents dans la Trising, la Lamat et la Blongkeng, les extractions y

demeurent encore très embryonnaires en 2011 (moins de 30 travailleurs par jour). Ces sites sont un excellent exemple de l'adaptation extrêmement rapide des sociétés locales aux changements environnementaux qui peuvent survenir après une éruption.

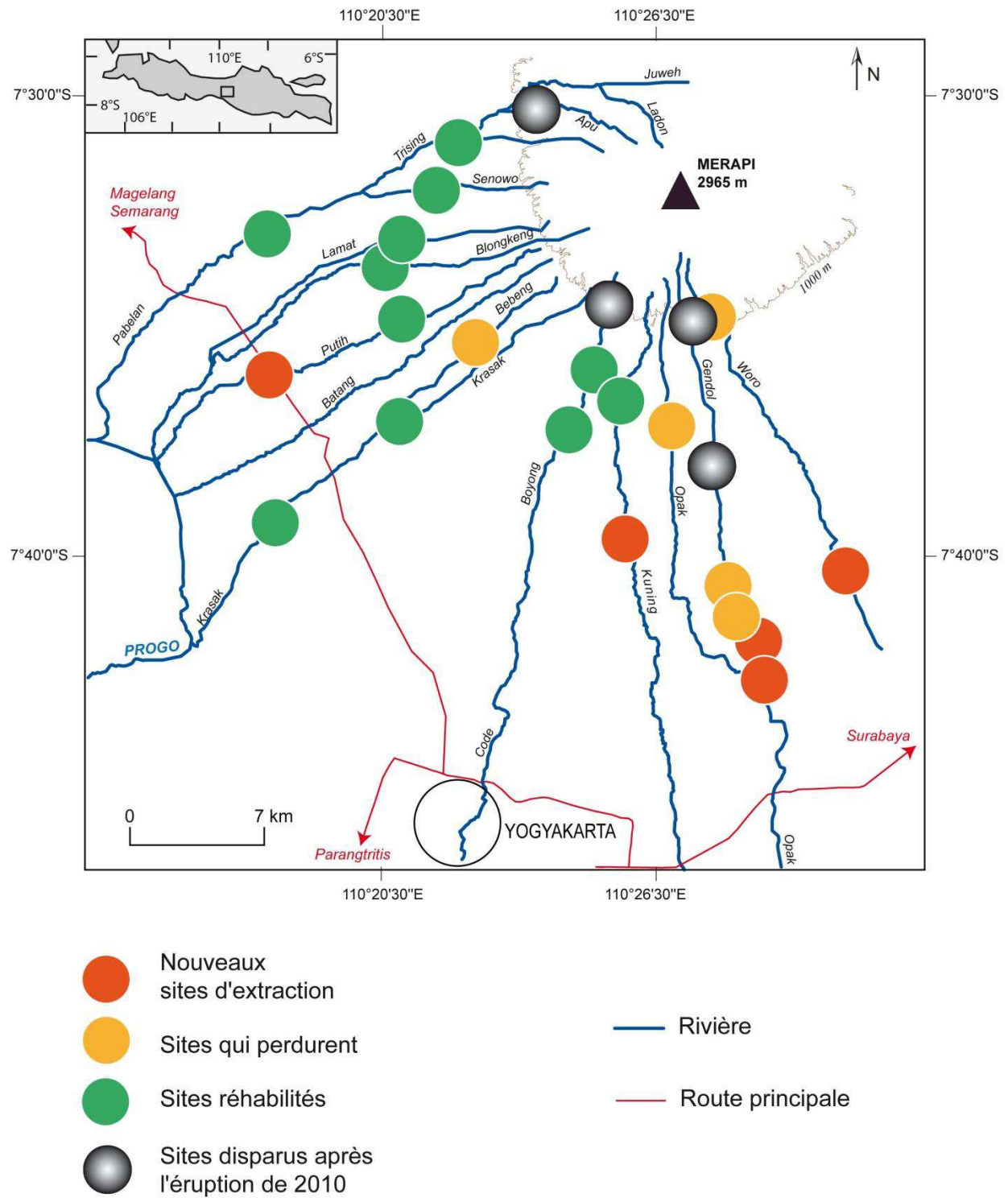
1.3 Les sites qui perdurent

Cinq sites (Figure 154) sont regroupés dans cette catégorie qui concerne les portions de vallée où l'activité d'extraction s'est maintenue jusqu'en 2010, et qui ont pour certains bénéficié d'un second souffle après l'éruption et les lahars qui ont suivi. Il s'agit d'abord du site « secondaire » d'extraction en 2010 Balerante (voir chap. 6), en amont de la Woro, qui a été parcouru par quelques lahars après l'éruption, ainsi que du site de l'amont de la Bebeng où l'activité se maintient fort bien, avec une fréquentation quotidienne assez élevée (voir *infra*). Les anciens sites « satellites » de Jambu-Kaliadem, vers lesquels se déversait le trop-plein de travailleurs avant l'éruption, se sont également maintenus mais à des degrés divers. Les sites de l'aval de la Gendol (Argomulyo), où l'activité d'extraction demeurait dans l'ombre de Jambu-Kaliadem sont désormais le cœur des extractions du Merapi. En revanche, l'ancien site « satellite » de Pagerjurang (Opak) perdure, mais avec des fréquentations irrégulières, l'essentiel des flux étant capté par la Gendol. C'est dans cette catégorie que les transformations ont été les plus spectaculaires, avec des sites d'extraction peu fréquentés avant l'éruption, affichant des fréquentations de plusieurs centaines de travailleurs par jour en 2011.

1.4 Les sites qui ont disparu

Enfin, quatre sites d'extraction (Figure 154) qui existaient avant l'éruption, ont disparu ensuite. Il s'agit du site de la Apu, au nord-ouest du volcan, celui de Mangunsuko (Senowo), celui de Turgo (Boyong), celui de Manggong dans la Gendol, ainsi que Jambu-Kaliadem. Ce qui représentait avant l'éruption de 2010 le pôle des extractions de matériaux volcaniques autour du Merapi, avec des fréquentations très élevées (voir chapitre 6), a disparu en 2011. Les impacts de l'éruption ont été particulièrement intenses dans l'amont de la Gendol, où se sont déversées plusieurs coulées et déferlantes pyroclastiques. Les villages qui longeaient le site, de Kaliadem à Kopeng, puis ensuite à Manggong, ont été entièrement rasés. Les routes ont disparu, vallées et interfluves ont été, notamment à Kaliadem, entièrement recouverts par les dépôts pyroclastiques. L'accessibilité au site étant désormais nulle, l'activité d'extraction n'a pu s'y maintenir. La disparition des voies de communication est également responsable de l'abandon des autres sites qui ne sont plus exploités en 2011 : le pont qui permettait d'accéder à la Apu a été emporté, le versant dans lequel était aménagée la route pour se rendre au site d'extraction amont de la Senowo s'est écroulé, tout comme celui qui joignait le village de Turgo au fond de la Boyong. Dans les années 2000, des sites disparaissaient par manque de matériaux volcaniques ; mais la mise en place brutale de nouveaux dépôts s'est accompagnée, localement, de la disparition de l'autre condition de développement des extractions : les voies de communication. Dans tous les cas, l'activité a été redistribuée : vers la Pabelan dans le cas de la Apu, et d'une manière générale plus en aval dans le cas de la Senowo, de la Boyong, et bien sûr de la Gendol.

Cette nouvelle répartition des sites d'extraction est contrainte par deux facteurs : la distribution des dépôts de l'éruption de 2010, et les conditions d'accès aux vallées. L'éruption de 2010 remet en



cause le schéma amorcé en 2006, à savoir le déclin progressif des sites de l'ouest, associé à une croissance rapide des sites du versant sud. En 2011, l'ensemble des vallées auparavant exploitées le sont à nouveau, et les extractions s'étendent loin en aval. Malgré la disparition de cinq sites, on compte une vingtaine de sites d'extraction sur le pourtour du Merapi en 2011, soit deux fois plus qu'en 2010. Ce chiffre est comparable au nombre de sites qui ont pu être identifiés dans les années 1990 jusqu'au début des années 2000. Cependant, tous ne sont pas exploités de la même manière : certains sont densément fréquentés, alors que d'autres ne le sont que de manière anecdotique.

2. Fréquentation des sites d'extraction, volumes exploités et prix des matériaux après l'éruption de 2010

2.1 Une fréquentation inégale

Les campagnes d'observation ont révélé certaines disparités entre les sites d'extraction après l'éruption du Merapi, entre ceux dont la fréquentation quotidienne est anecdotique (essentiellement les vallées occidentales hors Putih et Bebeng), et ceux qui, au contraire, apparaissent très fréquentés (Bronggang et Plumbon dans la Gendol). Les diagrammes (Figure 155A et B) résument les comptages réalisés pour l'ensemble des sites d'extraction en juin 2011. Mis à part quatre sites, où les fréquentations sont à plus de 200 travailleurs par jour, le maximum étant à plus de 900 à Bronggang, la plupart sont peu voire faiblement fréquentés (< 100 travailleurs par jour), notamment pour l'ensemble des vallées du nord-ouest où la fréquence des lahars n'a pas été particulièrement élevée.

La répartition horaire de la fréquentation montre deux sites à plus de 250 personnes recensées le matin dans l'aval de la Gendol à Plumbon et à Bronggang, mais avec des effectifs en forte baisse dans l'après-midi (Figure 156). À Balerante (Woro) et à Sudimoro (Bebeng), le pic de fréquentation a lieu également le matin, entre 50 et 100 personnes recensées, avant une baisse des effectifs en milieu d'après-midi. En revanche, le reste des sites d'extraction, au sud comme à l'ouest, restent homogènes tout au long de la journée avec pour certains des pics à 30 personnes le matin (Pondokrejo dans la Krasak, Kaliurang dans la Bebeng, Kemiricilik dans la Boyong et Jumoyo dans l'aval de la Putih). Les sites faiblement fréquentés (Trising, Senowo, Pabelan, Lamat, Blongkeng) n'ont pas de pic de fréquentation sur une journée. De manière exceptionnelle, sur deux sites, Jumoyo (Putih) et Plumbon (Gendol), les extractions ont lieu également de nuit pour aider au curage des rivières (voir chap. 4) ; toutefois, l'absence d'éclairage suffisamment puissant sur l'ensemble des sites n'a pas permis d'obtenir des estimations suffisamment précises du nombre de travailleurs. Dans les deux cas, le pic d'activité nocturne a lieu entre 19h et minuit, avec une soixantaine de travailleurs présents. On observe donc une opposition entre quelques sites majeurs, Bronggang et Plumbon dans la Gendol, accompagnés, mais à un degré moindre, de Jumoyo (Putih) et Balerante (Woro) et grand nombre de sites à fréquentation plus modeste (Figure 155A et B et Figure 156).

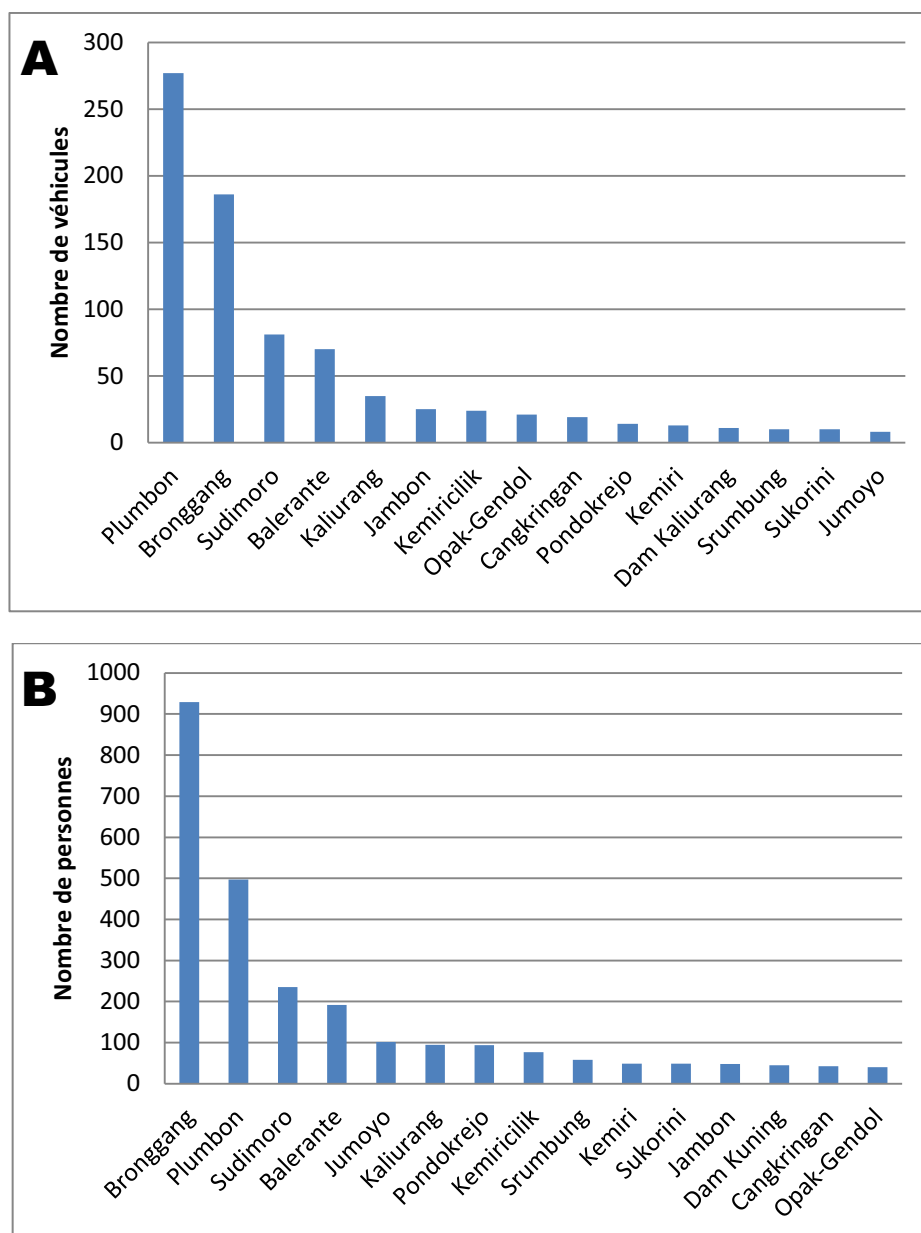


Figure 155 - Fréquentation quotidienne moyenne des sites d'extraction du Merapi en 2011 (observations de terrain et enquêtes de juin 2011).

A : nombre de véhicules par jour. B : nombre de personnes fréquentant le site chaque jour.

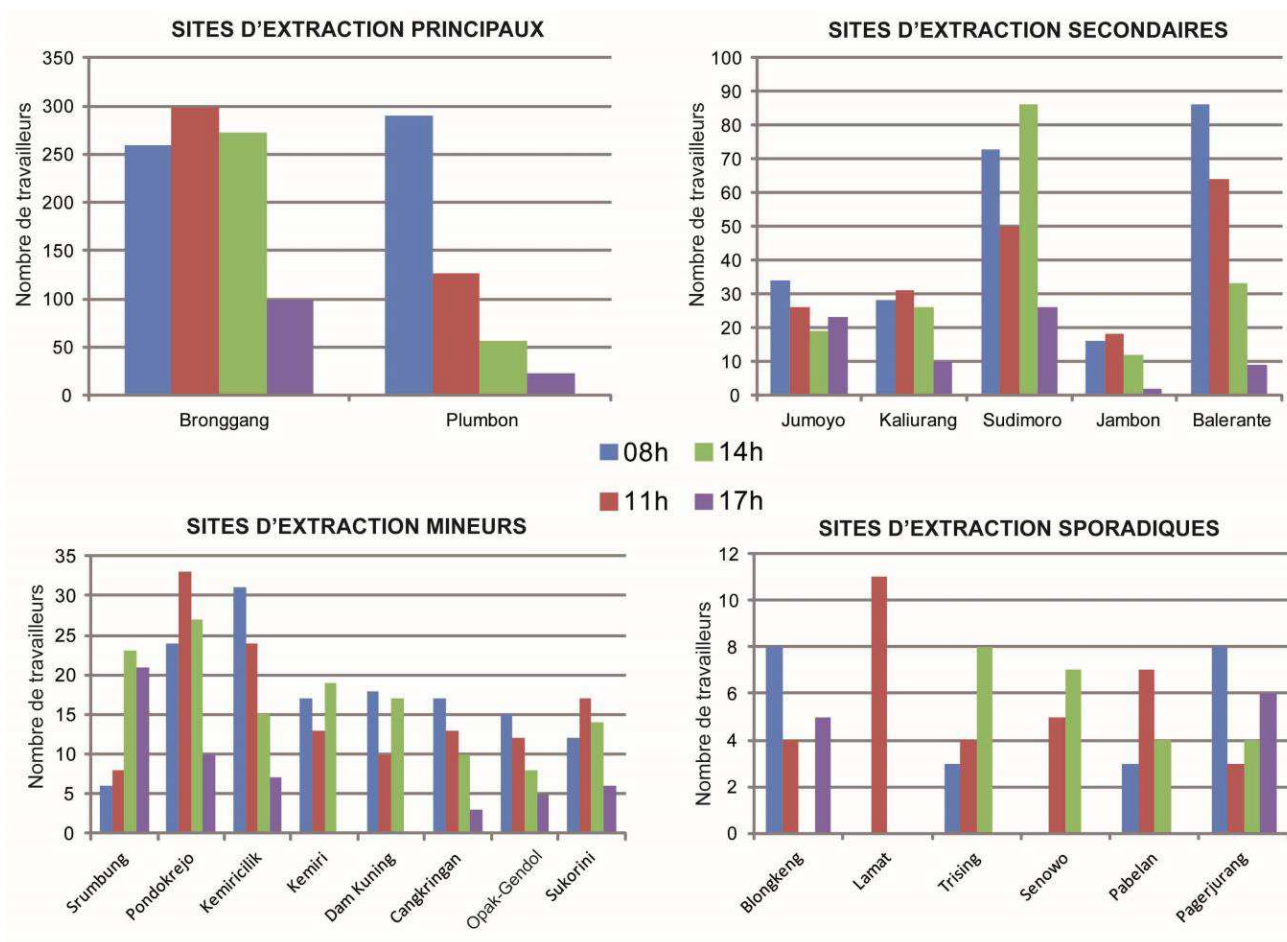


Figure 156 - Fréquentation horaire des sites d'extraction du Merapi sur une journée de travail
(comptages réalisés à heures fixes en juin 2011)

2.2 Volumes extraits et typologie des sites

2.2.1 Des volumes à la baisse ?

Les camions qui vont et viennent dans les vallées sont des Colt Diesel d'une capacité de 4 m³. La tendance à la disparition des gros camions-bennes depuis le milieu des années 2000 est vérifiée en 2011 après l'éruption ; la valeur retenue pour l'estimation des cubages est donc de 4 m³. Les moyennes de fréquentation ont été obtenues par comptage du nombre de camions présents sur les sites d'extraction sur une journée de 7h à 17h, l'essentiel des activités cessant à la nuit tombée. Toutefois, pour les sites de Jumoyo, Bronggang et Plumbon, le comptage a pris en compte la présence de camions sur une tranche horaire plus large jusqu'à minuit – la fréquentation est nulle ensuite.

Pour estimer les volumes extraits, la méthode de calcul est similaire à celle réalisée au chapitre 6, et se fonde sur le nombre de camions circulant par jour sur un site. Les calculs ont pris en compte la présence d'extractions nocturnes dans les sites Bronggang et Plumbon. Les volumes extraits par site montrent des valeurs inférieures à celles des années 2000 : quotidiennement, ce sont environ 4350 m³ de blocs et de sables qui sont extraits, contre 12 102 m³ au début des années 2000, 9523 m³ au milieu des années 2000 et 6032 m³ en 2010 avant l'éruption. La tendance à la baisse déjà repérée se confirme très nettement, et mérite d'être discutée. Après l'éruption de 2010, le maximum d'exploitation est localisé dans les sites en aval de l'ancien site de Jambu-Kaliadem (Gendol). Ce dernier, avec ses sites

satellites et l'amont de la Woro, représentait le principal bassin d'extraction de l'ensemble des sites juste avant l'éruption de 2010, et représentait environ 5000 m³ de matériel par jour (chap. 6). Un an après, l'aval de la Gendol où se trouvent désormais les nouveaux sites d'extraction principaux, totalise un volume maximal d'exploitation quotidien de 2900 m³ soit presque deux fois moins qu'avant l'éruption. Les raisons de cette franche baisse sont multiples, et affirment pour la plupart les tendances évoquées au chapitre 6. Il s'agit de l'abandon des volumineux camions-bennes autrefois employés pour le transport du matériel, et dont les modèles dépassaient les 18 m³. Toutefois, les excavateurs et les pelleteuses ont été de nouveau autorisés sur certains sites d'extraction, notamment dans le bassin d'extraction principal, et leur utilisation s'accompagnera certainement plus tard de l'utilisation de camions-bennes plus lourds (comm. orale N. Cholik, BPPTK) ; en 2011, ceux-ci n'étaient pas encore visibles.

Par ailleurs, la fréquentation quotidienne des sites d'extraction est moindre. Juste avant l'éruption de 2010, les sites du bassin d'extraction principal regroupaient plus de 1100 camions par jour, principalement à Jambu-Kaliadem. En revanche, après l'éruption, les sites du bassin principal sont fréquentés par 730 camions par jour. La multiplication des sites sur l'ensemble du volcan en est la raison principale : le regroupement, inévitablement provoqué par la réduction de la ressource à quelques portions de rivières, est désormais dissous sur un espace plus vaste, ce qui limite la fréquentation de chaque site. Cependant, l'impression de forte densité demeure, car les sites aval de la Gendol sont de taille plus réduite que Jambu-Kaliadem, qui s'étirait sur 2 km vers l'amont. Quelques mois après l'éruption, certains sites comme Plumbon ou Bronggang restent encore très resserrés autour des voies d'accès principales. Pour l'instant, les effectifs quotidiens et les volumes y restent modestes, même si très nettement supérieurs aux autres sites d'extraction qui se sont (ré)-installés à l'ouest du Merapi.

2.2.2 Répartition des sites après l'éruption

La typologie fondée sur le critère des volumes extraits par jour permet de distinguer trois types principaux : la formation d'un nouveau bassin d'extraction principal, l'apparition d'une série de sites secondaires et mineurs tout autour du Merapi, et enfin des sites au fonctionnement sporadique, très peu fréquentés.

- Le nouveau bassin d'extraction principal

Avant l'éruption de 2010, le site de Manggong-Argomulyo était qualifié comme « site satellite » de Jambu-Kaliadem, bénéficiant de sa proximité pour continuer d'exister. La fréquentation était faible, composée pour la plupart d'équipes qui ne parvenaient pas à creuser de carrières à Jambu-Kaliadem, mais aussi de riverains qui venaient chercher quelques matériaux pour leur consommation personnelle. En marge des circuits, ce site était appelé à disparaître à brève échéance. Cependant, l'éruption de 2010 a eu un double effet : le site de Jambu-Kaliadem a disparu, et comme les coulées et déferlantes ont atteint Argomulyo, d'abondants dépôts ont été mis en place en aval de la Gendol, régulièrement renouvelés par les lahars. D'ancien satellite, la partie aval de Manggong-Argomulyo est devenue le nouveau noyau des extractions après l'éruption (Figure 157A et Figure 158). Les sites de Bronggang, Plumbon, Jambon et Opak-Gendol répartis entre les communes d'Argomulyo et Sindumartani ont formé dès les premiers mois qui ont suivi l'éruption le nouveau bassin d'extraction principal autour du Merapi. Compte-tenu de l'abondance de matériel pyroclastique en amont, l'activité est appelée à s'intensifier davantage dans les années à venir, et l'ensemble des trois sites Bronggang-Plumbon-Jambon formera très certainement un nouveau site d'extraction continu de très grande taille, au fonctionnement similaire à Jambu-Kaliadem. Opak-Gendol, situé un peu plus en aval au niveau du confluent, donc moins souvent touché par les lahars et moins exploité, deviendra certainement, à

l'image du modèle spatial caractérisé avant l'éruption un satellite directement tributaire du super-site qui se formera. La réouverture de l'ancien site de Jambu-Kaliadem, ou même de Manggong pourra faire émerger un site secondaire concurrent. Mais pour en 2011, l'aval de la Gendol demeure le bassin d'extraction principal, très nettement polarisant, attirant des effectifs de toute la région de Java Centre (voir *infra* II. 2). Les rythmes d'extraction y sont au moins trois fois supérieurs à ceux des sites secondaires, et près de 100 fois supérieurs à ceux des sites sporadiques.

- **Les sites secondaires et les sites mineurs**

La fréquentation des sites secondaires et mineurs est stable, mais très en retrait par rapport aux sites du bassin principal (Figure 157B et C et Figure 158). Les volumes extraits chaque jour n'excèdent pas les 300 m³, avec une limite basse à 40 m³. Les sites secondaires, où au moins 100 m³ sont exploités chaque jour, ont pour caractéristique commune d'être bien situés le long d'axes majeurs (Jumoyo) ou bien d'être d'anciens sites qui n'ont pas été trop endommagés par les coulées et déferlantes pyroclastiques de 2010 (Kaliurang, Sudimoro, Balerante). L'activité s'y maintient à un rythme encore faible, mais qui peut s'intensifier dans la Putih où le renouvellement de la ressource est assuré par des lahars fréquents. En revanche, la poursuite des extractions à Balerante ou sur les sites de la Bebeng est soutenue aussi bien par les quelques lahars qui s'y sont écoulés que par l'ancienneté de l'activité qui fait de ce site un lieu d'extraction traditionnel.

Les sites mineurs, aux effectifs et aux volumes très modestes, sont localisés sur l'ensemble des vallées depuis la Putih jusqu'à la Woro, à l'exception de la Batang. Il s'agit de sites anciens pour la plupart, qui ont été réhabilités après l'éruption (Srumbung dans la Putih, sites de la Boyong, Dam Kuning, Pondokrejo dans la Krasak). La fréquentation et la vente sont essentiellement animées par des flux locaux car ces sites sont souvent assez éloignés des routes principales. Comme l'activité d'extraction y avait un temps disparu, voire n'y avait jamais existé avant (Cangkringan dans la Kuning, Sukorini dans la Woro), elle demeure encore embryonnaire.

- **Les sites à fréquentation irrégulière (sites sporadiques)**

Le dernier cas de figure est une originalité qui existait dans les années 1990 sur quelques portions en aval de la Putih (chap. 6), mais qui après l'éruption se retrouve dans la plupart des vallées du nord-ouest du Merapi. Dans la Trising, la Senowo, la Pabelan, la Lamat et la Blongkeng, mais également à Pagerjurang dans la Opak, se trouvent des sites d'extraction à fréquentation irrégulière (Figure 157D et Figure 158). Ils sont vides la plupart du temps, fréquenté par quelques véhicules tôt le matin seulement. Certains sites (Trising, Lamat) ne sont pas exploités pendant deux ou trois jours d'affilée. Les effectifs y sont très bas, en moyenne 3 camions dans la Lamat ou la Senowo, 5 à Pagerjurang, presque toujours présents le matin seulement. Ces sites sont qualifiés de sporadiques, d'abord parce que le réseau routier fait très largement défaut, notamment dans la partie nord-ouest du Merapi. La plupart des ponts de la Putih et de la Pabelan ont été emportés par les lahars de décembre à mars, ce qui rend l'accès aux vallées Trising, Lamat ou Senowo extrêmement difficile pour des camions qui doivent emprunter des chemins peu larges. Les temps de parcours sont rallongés à cause de détours à opérer dans la région de Muntilan (chap. 4, Figure 72). En outre, les voies d'accès aux sites de la Senowo ont disparu suite à des éboulements répétés après le passage des premiers lahars qui ont fortement sapé les parois de la vallée, ce qui oblige là encore à de longues déviations pour trouver une autre entrée. Cet exemple montre à quel point la route et les voies d'accès sont déterminantes dans la localisation et le fonctionnement des sites d'extraction. Le mauvais état de la voirie est l'élément principal de l'irrégularité de fréquentation de la plupart des sites du nord-ouest du Merapi, ainsi que du site de Pagerjurang, dans la Opak.

Dans la partie distale de la Opak, en aval du confluent avec la Gendol, se trouvent des points d'extraction qui tendent à se développer à la fin de l'année 2011, mais qui ne constituent pas de



Figure 157 - Vues des différents types de sites d'extraction après l'éruption de 2011 (photos E. de Bélizal). A : **Plumbon**, Gendol, bassin d'extraction principal (juin 2011). B : **Kaliurang**, Bebeng, site secondaire (février 2011). C : **Kemiricilik**, Boyong, site mineur (janvier 2011). D : **Pagerjurang**, Opak, site sporadique (janvier 2011).

carrières puisque les dépôts ne sont pas creusés, mais pompés par des dragueuses, parfois dans le lit mineur de la rivière qui parcourt le corridor. Cette technique demeure encore très peu répandue autour du volcan, car elle suppose l'utilisation d'un groupe électrogène pour alimenter la pompe.

2.3 Évolution des prix

La démultiplication des sites d'extraction ne marque pas d'accentuation significative des volumes extraits. Aussi, les prix sont restés globalement stables dans les mois qui ont suivi l'éruption, autour de 50 000 Rp / m³ pour du sable et 100 000 Rp / m³ pour les blocs (Tableau 36). L'étalement de la distribution spatiale de l'activité amène une certaine disparité de la valeur du sable en fonction de sa provenance, phénomène bien plus visible désormais qu'avant l'éruption de 2010, lorsque la quasi-totalité de la production ne provenait que d'un seul site principal. Désormais, les diverses origines de la ressource permettent aux *depo pasir* qui les achètent d'en comparer la qualité, qui repose d'abord sur la texture du sable (cf. chap. 5).

Tableau 36 – Comparaison des prix du sable pratiqués dans plusieurs depo pasir industriel ou de proximité situés à proximité des sites évoqués. Le sable directement vendu hors Merapi coûte entre 5 et 7 fois plus cher (marchés de Solo ou de Semarang). Texture du sable : d'après analyse granulométrique (chap. 5).

Talus	Exemple de site d'extraction	Type de sable	Prix de vente (Rp)	
			m ³	Camion 4 m ³
Proximal	Balerante (Woro)	Grossier	50 000	200 000
Médial	Srumbung (Putih)	Grossier	50 000	200 000
	Sudimoro (Bebeng)	Grossier	85 000	350 000
	Kemiricilik (Boyong)	Très grossier	70 000	250 000
	Bronggang (Gendol)	Grossier	40 000	150 000
Distal	Pondokrejo (Krasak)	Fin	25 000	100 000
	Prambanan (Opak)	Moyen	25 000	100 000

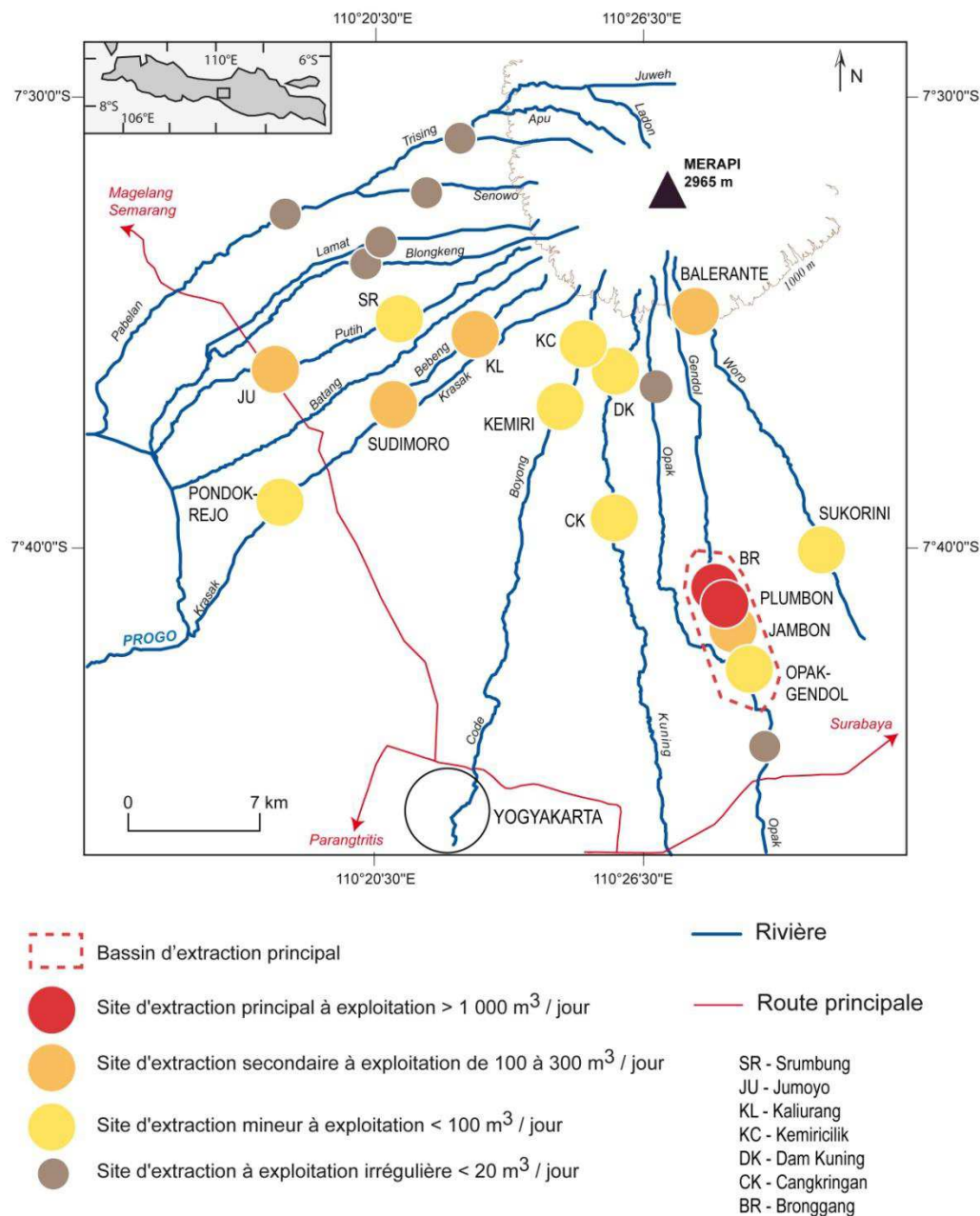


Figure 158 - Les volumes de sables et de blocs extraits après l'éruption de 2010 (juin 2011)

La grande quantité de matériel pyroclastique et la fréquence de lahars consécutifs à l'éruption de 2010 ont entièrement refondu l'organisation générale des sites d'extraction au Merapi. Certains sites qui n'existaient pas se sont créés, d'autres qui avaient disparu ont été réinstallés, certains qui existaient se sont maintenus, d'autres, enfin, ont fermé. L'étude de premières estimations de volumes extraits quotidiennement confirme la baisse d'intensité de l'exploitation, mais qui sera contrebalancé très rapidement à cause de l'utilisation à nouveau autorisée des engins mécaniques et la possible réintroduction des camions-bennes volumineux. La hiérarchie spatiale des sites d'extractions a montré qu'un nouveau bassin d'extraction s'était mis en place en aval de la Gendol, et commence à jouer un rôle polarisant. L'échelle des prix ne montre pas encore de modification majeure. Les conditions particulières dues à la très grande quantité de matériel disponible a nécessité un réajustement des conditions de travail auxquelles une enquête par questionnaire systématique a tenté de répondre.

II. Travailler dans les sites d'extraction après l'éruption de 2010 : résultats du questionnaire de 2011

Tableau 37 – Taux d'interrogation des personnes enquêtées par site (* au jour de l'enquête)

Sites	Nombre de personnes présentes*	Nombre de personnes interrogées	Taux d'interrogation (%)
Srumbung	58	44	76
Jumoyo	102	40	39
Kaliurang	95	65	68
Sudimoro	235	70	30
Pondokrejo	94	53	56
Kemiricilik	77	38	49
Kemiri	49	38	78
Dam Kuning	45	29	64
Cangkringan	43	25	58
Bronggang	929	70	8
Plumbon	497	72	14
Jambon	48	48	100
Confluent	40	40	100
Balerante	192	75	39
Sukorini	52	26	50
TOTAL	2556	733	29

1. Aperçu des résultats

1.1 Caractéristiques socioéconomiques des travailleurs : les extractions comme solution aux problèmes de chômage ?

L'enquête a eu lieu dans les sites d'extraction fréquentés à > 30 travailleurs par jour (Tableau 37; Figure 159) en juin 2011 (cf. chap. 2, annexe D.3.1). La plupart des résultats observés confirment ceux obtenus en 2009 lors de l'enquête réalisée sur le site de Jambu-Kaliadem (voir chap. 6). L'activité d'extraction en 2011 concerne essentiellement des travailleurs masculins qui représentent 93,2% des répondants (87% en 2009). La plupart des répondants ont 40 ans en moyenne, avec seulement 16,1% de 18-30 ans. Le plus jeune interrogé a 19 ans, et est le seul individu sur la population totale ($n=733$) à être âgé de strictement moins de 20 ans. Toutefois, le pourcentage de travailleurs d'âge strictement supérieur à 50 ans évalué à 12% est très équivalent à celui calculé dans la Gendol en 2009 (13%), avec un âge maximal similaire (68 ans en 2011 et 70 ans en 2009). On remarque également que 88,8% des personnes interrogées sont des chefs de famille (les hommes comme les femmes), et que près de 80% se déclarent indépendants ou membre d'une équipe informelle. L'extraction de matériaux volcaniques reste une activité d'abord faiblement encadrée, spontanée de quasi-subsistance – au point qu'il s'agit presque d'extraction « vivrières », dans un contexte difficile (accès à la terre difficile, pression démographique, taux de chômage élevé).

La plupart des répondants vivent dans l'un des quatre districts autour du volcan Merapi (environ 82%). À ceux-ci s'ajoutent d'autres personnes venant de l'agglomération de Yogyakarta (6% avec Bantul et Kulon Progo). Enfin, 12% des travailleurs proviennent de régions plus lointaines : 3% vivent dans la région de Solo, à une soixantaine de km à l'est du Merapi, et 9% de

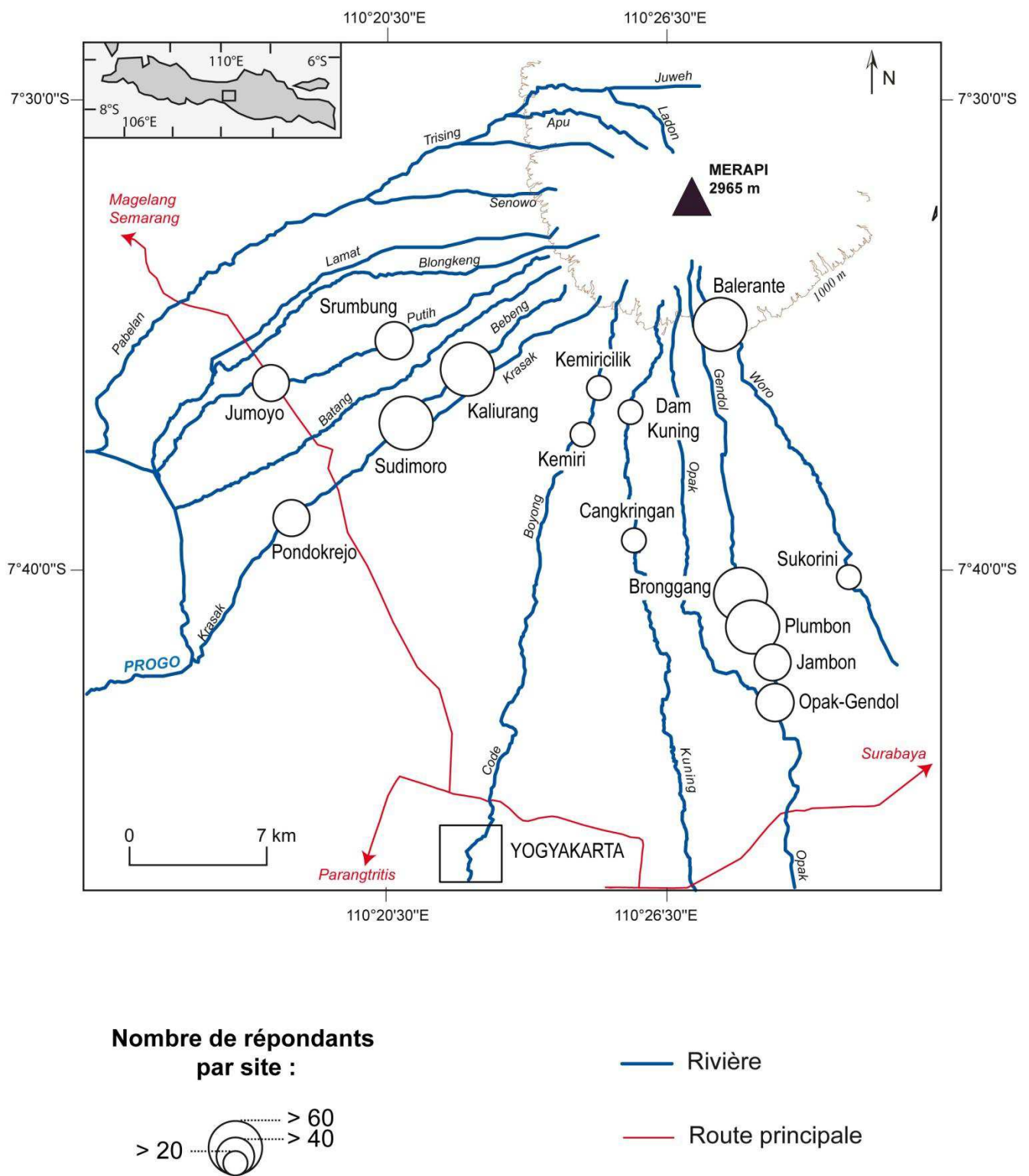


Figure 159 - Les sites d'extraction retenus pour l'enquête par questionnaire

la région de Semarang, cinquième agglomération indonésienne sise au nord de l'île de Java. Parmi les personnes interrogées, plus d'une centaine font de longs trajets pour se rendre dans les vallées du Merapi. Cela traduit le rayonnement certain de cette activité, qui reste toujours assez rémunératrice. 52,1% des répondants gagnent plus de 60 000 Rp (5 €) par jour (dont 21,3% > 100 000 Rp), ce qui représente près de quatre fois le salaire quotidien moyen d'un agriculteur non propriétaire (le cas de figure le plus répandu au Merapi). Ce chiffre est supérieur à celui obtenu lors du questionnaire préliminaire réalisé à Jambu-Kaliadem en 2009 : l'activité est très lucrative dans les six mois qui ont suivi l'éruption. On ne s'étonnera donc pas de remarquer que tous les travailleurs ont exercé ou exercent encore en plus des extractions des métiers le plus souvent peu rémunérateurs (chasseurs, chauffeurs, éleveurs, cultivateurs sont très représentés). Ce sont en effet près de 43% des répondants qui ont un deuxième emploi en plus de leur travail de mineur dans les vallées du Merapi : les extractions prennent, là encore, la pleine mesure d'une activité d'abord spontanée. 40% des travailleurs interrogés ont abandonné leur ancienne profession pour rejoindre les carrières des sites d'extraction. La plupart d'entre eux étaient agriculteurs auparavant (saisonniers pour la plupart), mais on trouve également d'anciens maçons, tenanciers de *warung* ou des chauffeurs. Enfin, 14% souhaiteraient exercer une autre profession en plus des extractions, mais ne parviennent pas à trouver d'emploi.

1.2 Organisation du travail

L'éruption de 2010 a très fortement augmenté le nombre de sites d'extraction, sans qu'une augmentation du nombre de travailleurs soit flagrante. Le comptage total de travailleurs sur une journée donne environ 2600 personnes (estimation nécessairement minorée compte tenu des extractions nocturnes), qui équivaut au double des effectifs recensés sur le seul site de Jambu-Kaliadem en 2010. L'étalement des sites d'extraction autour du Merapi réduit la fréquentation moyenne à 170 personnes par site, ce qui est très inférieur à ce qui peut être observé avant l'éruption, lorsque l'activité était circonscrite principalement au versant méridional du volcan.

Presque 60% des répondants ne travaillent dans les sites d'extraction que depuis la fin de l'éruption : les bouleversements économiques et environnementaux qui ont perturbé l'agriculture sont contrebalancés par ces travaux d'extraction spontanés. Ce chiffre semble suggérer que la majorité des travailleurs sont nouveaux, ce qui est en légère contradiction avec l'estimation du nombre total de travailleurs par jour qui ne montre pas de croissance des effectifs totaux aussi importante. Il peut s'agir d'une estimation un peu tronquée, mais il est probable également qu'un certain nombre de personnes ait abandonné l'activité suite à l'éruption : le déplacement vers les camps de réfugiés et la destruction complète des villages proches du bassin d'extraction principal avant l'éruption ont pu modifier certaines habitudes.

Sur l'ensemble des sites, la plupart des répondants ont des rôles bien définis (63% de creuseurs, 37% de chauffeurs) et travaillent tous en équipe de 4 ou 5 autour d'un camion à remplir. 43,4% ont des équipes permanentes, formées par affinités (voisinage, famille) tandis que 37,7% en changent régulièrement. Les travailleurs indépendants qui ne dépendent d'aucune équipe et viennent avec leur propre véhicule sont plus rares (17,3%). Cependant l'ensemble des travailleurs reste fidèle à un même site : 73,4% ne changent jamais de site d'extraction, 20,1% changent parfois et 4,4% changent souvent. La majorité travaille de 6 à 10 heures par jour, au moins 3 jours par semaine ; 8,2% affirme travailler tous les jours. Pour 22,8%, le rythme hebdomadaire n'est pas régulier, ce qui n'est guère étonnant lorsque l'on sait que beaucoup pratiquent un autre métier.

La plupart des ventes du matériel extrait se font autour du Merapi, dans les *depo pasir* (magasins de revente, voir chap. 6) situés au bord des routes principales, surtout dans la région de

Yogyakarta (27,7%) et à Magelang (18%). Des pourcentages comparables sont vendus à Semarang (16,1%) et à Solo (12,6%). Quant aux autres destinations plus lointaines (Java Centre et Java Est), elles correspondent aux lieux de résidence des travailleurs : ceux qui viennent de Jepara, de Pacitan ou de Kudus partent tôt de chez eux le matin, remplissent le camion, et retournent le soir vendre leur cargaison. Seuls 2,2% des travailleurs revendent le sable au détail, chez eux.

1.3 La question de l'exposition à des aléas fréquents

Un site d'extraction attractif est une portion d'un corridor de lahar suffisamment alimenté en dépôts volcanoclastiques. De fait, les sites les plus fréquentés sont ceux où les lahars sont aussi les plus fréquents. Les sites où la majorité des travailleurs ont abandonné leur ancienne activité pour se consacrer uniquement aux extractions sont d'ailleurs ceux où la fréquence d'occurrence des lahars est la plus élevée (Putih, Gendol à Bronggan et Plumbon). En février 2011, les lahars ont causé la mort de 2 mineurs à Pondokrejo dans la Krasak, montrant que le risque d'accident existe. Qu'en est-il de la perception du danger des mineurs ?

Les questions concernant les aléas ont obtenu de bonnes réponses : la totalité des travailleurs, y compris ceux qui habitent le plus loin et qui pourraient être moins accoutumés aux milieux volcaniques, savent quels phénomènes sont susceptibles de survenir, et quelles en sont les principales caractéristiques. Beaucoup (92%) ont d'ailleurs déjà observé à un lahar, dont la fréquence d'occurrence était très élevée suite à l'éruption. En revanche, un quart des répondants déclare continuer de travailler même s'il pleut au sommet du Merapi, et acceptent donc le risque de se voir eux-mêmes ou leur matériel emportés par un lahar. Il est en outre fréquent de voir des travailleurs remplir leur camion même quand l'alerte est lancée (Kemiri 8 mars 2011 ; Plumbon 21 mars 2011). Il existe donc, pour certains, une dualité entre connaissance des dangers potentiels et risques encourus, une incohérence entre perception et pratique. Ce résultat est à mettre en relation avec le questionnaire de perception effectué dans les villages (chap. 4, annexe D.1.2) : l'analyse bivariable a montré que ceux qui travaillent dans des sites d'extraction ont une bonne connaissance des mécanismes et des impacts liés aux lahars... mais cependant déclarent ne pas en avoir peur. En s'exposant aux lahars lorsque ceux-ci sont fortement probables s'il pleut au sommet du Merapi, les risques d'incidents voire d'accidents se multiplient. Pendant le lahar du 21 mars 2011 dans la Gendol, les pelleteuses de Plumbon ont continué de creuser quand bien même le lahar était déjà en vue ; le 8 mars 2011 à Kemiri, des travailleurs ont refusé d'évacuer alors qu'ils étaient avertis depuis plusieurs dizaines de minutes qu'un lahar était signalé en amont, et n'ont pu quitter le site qu'au dernier moment. Dans les deux cas, aucun problème n'est survenu, mais de telles conduites sont propices aux incidents et accidents : trois pelleteuses ont été emportées par un lahar à Jambon le 22 mars 2011 (plusieurs dizaines de millions de rupiahs de dégâts, soit plusieurs milliers d'euros). Durant la première partie de la saison des pluies 2011-2012, une dizaine de camions a été bloquée par des lahars d'intensité faible dans des sites d'extraction dont ils n'ont pu sortir, et deux véhicules ont été emportés dans la Krasak le 21 janvier 2012.

L'exposition aux aléas est le prix à payer pour pouvoir bénéficier d'une ressource importante au Merapi, encore plus peut-être en contexte post-éruptif pour rattraper le manque à gagner subi par les déséquilibres socio-spatiaux provoqués par une éruption telle que celle de 2010. L'aspect fondamental des sites d'extraction réside ainsi dans cette particularité spatiale où la zone d'exploitation correspond au corridor des lahars : il ne s'agit pas de parties de villages pouvant être balayées par une défluviation ou un débordement (voir chap. 3 et 4), mais au contraire d'un espace que traversent systématiquement les lahars à chacune de leurs occurrences, quelque soit leur intensité. En venant y installer leurs carrières, les travailleurs acceptent donc ce danger : au lieu d'être un espace

répulsif, les corridors de lahars attirent au contraire des flux quotidiens de plusieurs centaines voire de plusieurs milliers de personnes. La notion de prise de risque, évaluée par la question 19 (« continuez-vous à creuser alors qu'il pleut au sommet du volcan ? »), est ainsi centrale pour la compréhension des dangers dans les sites d'extraction, car elle dénote une certaine acceptabilité du risque. Elle sera analysée et discutée plus loin (III. 1).

1.4 Les adaptations d'un encadrement toujours faible et hésitant

Les gouvernements des différents districts (Magelang et Sleman, notamment) avaient mis en place un système de régulation de l'activité en obligeant les travailleurs à demander un permis officiel. Les lenteurs administratives, et une certaine faiblesse dans l'encadrement structurel étaient les révélateurs d'inévitables lacunes dans ces tentatives de régulations (chap. 6). L'éruption de 2010 a bouleversé ces fragiles tentatives, et semble avoir mis en suspens les interdictions en vigueur. L'usage des pelleteuses, interdites depuis 2001, est de nouveau autorisé, et une grande confusion entoure la question des permis. À l'évidence, le caractère spontané de cette activité n'a pas été entamé par les tentatives de régulations officielles : 96% des personnes interrogées n'ont jamais demandé ces permis, et 72% déclarent ne pas en avoir besoin pour creuser du sable. De nombreuses entreprises se sont créées pour profiter de cette manne, mais près de 10 mois après l'éruption, les administrations compétentes n'étaient pas en mesure d'en communiquer une liste. Beaucoup, si ce n'est toutes, opèrent dans un flou complet. Est-ce pour autant de l'illégalité si les autorités n'ont pas encore mis en place de régulation officielle ? L'organisation en demeure en tout cas toujours informelle.

Compte tenu du caractère exceptionnel des volumes mobilisés par l'éruption et les processus volcanoclastiques qui ont suivi, les dépôts de lahars se sont étendus loin en aval (chap. 3 et chap. 5). Lorsque les vallées ne sont plus encaissées (talus médial et distal), leur étalement inévitable a entraîné de profondes perturbations dans la gestion des espaces (chap. 3 et chap. 4). La très grande quantité de matériel apporté par les lahars oblige la présence quasi-permanente de professionnels capables de diriger de véritables chantiers de travaux publics pour nettoyer les routes coupées par des lahars, réguler le parcours de la rivière en incisant artificiellement le lit et aménager des digues à l'aide de pelleteuses (chap. 4). Avant l'éruption de 2010, les gouvernements régulaient les extractions dont ils percevaient une taxe. Après l'éruption, ils en sont devenus des acteurs à part entière puisqu'ils commandent une partie de l'exploitation des dépôts. En effet, dans le cas de Magelang, les dépôts évacués des routes sont ensuite vendus à Semarang, et les bénéfices sont partagés entre l'entreprise et le gouvernement. Dans le cas de la Opak, une fois construites ou reconstruites les digues après un lahar majeur, les pelleteuses participent aux extractions de la Gendol. Le type de contrat qui lie ces entreprises aux gouvernements n'a pas encore été rendu public, et les fonctionnaires interrogés semblent ne pas en connaître la teneur. La situation est particulièrement complexe, et encore très confuse quelques mois après l'éruption, traduisant le manque de prospective dans la gestion gouvernementale des extractions qui peine à anticiper, et qui s'adapte tant bien que mal ensuite. Quelques semaines à peine après la fin de l'éruption, en janvier 2011, se murmurait déjà qu'une mafia était apparue à Bronggang et à Plumbon, là où la ressource en dépôts était la plus conséquente. Il faudra attendre quelques temps encore pour pouvoir comprendre comment l'ensemble des acteurs des sites d'extraction interagissent après l'éruption ; le manque de recul empêche pour l'heure de comprendre dans le détail les éventuelles tendances mafieuses, sur lesquelles, bien entendu, le secret n'est pas explicitement dévoilé au doctorant, étranger de surcroît.

2. Variabilité spatiale des sites d'extraction

2.1 Les travailleurs

La plupart des sites illustrent les mêmes tendances générales concernant le profil des travailleurs, notamment leur genre. Dans 5 sites, les effectifs sont exclusivement masculins (Kaliurang, Dam Kuning, Cangkringan, Opak-Gendol, Sukorini). C'est à Srumbung, situé dans la Putih que l'on trouve le plus de femmes (34%). C'est aussi sur ce site que l'âge moyen est le plus élevé (52 ans contre 37 ans pour Plumbon). Les provenances géographiques des travailleurs sont toujours liées à la localisation du site, par effet de proximité. C'est dans la Gendol, bassin d'extraction principal, que se trouve la plus grande diversité des origines géographiques, traduisant le rayonnement géographique des sites (Figure 160), avec près de 40% de travailleurs provenant de régions extérieures au Merapi⁹. Cette situation est radicalement différente de 2009 : à Jambu-Kaliadem, aucun travailleur rencontré n'habitait hors du Merapi. Des valeurs comparables s'observent pour les niveaux d'étude des personnes interrogées, qui sont en très grande majorité toutes diplômées du secondaire. Cependant quelques diplômés du supérieur ont été rencontrés dans la Krasak (11%), compte tenu, peut-être, de difficiles conditions d'accès à l'emploi dans les sous-districts de Turi et de Tempel. Les sites qui « perdurent » sont généralement ceux où les travailleurs sont les plus anciens : 23% de nouveaux arrivés après l'éruption à Kaliurang (Bebeng) et 41% à Balerante (Woro). Toutefois, ce n'est pas dans les nouveaux sites que se trouvent les plus fortes concentrations de travailleurs récents. Si, à Cangkringan (Kuning), 92% ont été dénombrés, seuls 65% sont récemment devenus mineurs sur le site de Jumoyo (Putih). On peut s'étonner qu'à Sukorini (Woro) ce ne soit le cas que de 58% des travailleurs, et que de 46% à Jambon (Gendol). Il s'agit, à l'évidence, d'une redistribution de l'exploitation : certains travailleurs n'ont plus besoin d'aller loin pour trouver des sites d'extraction. Il n'y a donc pas de relation évidente entre l'ancienneté d'un site d'extraction et celle des travailleurs.

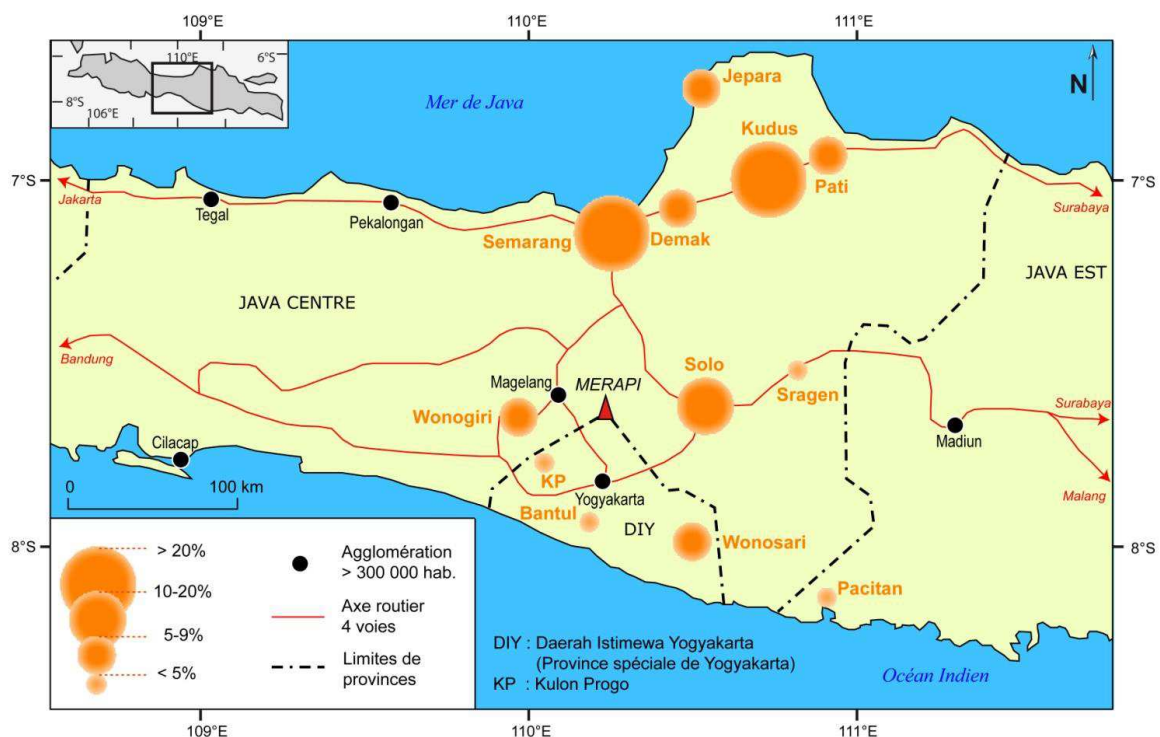


Figure 160 - Provenance des travailleurs de la Gendol extérieurs à la région du Merapi

⁹ C'est-à-dire hors des quatre districts qui se partagent l'espace du Merapi : Magelang, Sleman, Klaten et Boyolali, voir Introduction.

2.2 Conditions de travail

Des disparités de bénéfices existent à l'échelle d'une même vallée : dans la Boyong, les personnes interrogées à Kemiri gagnent plus par jour que ceux de Kemiricilik situé en amont ; dans la Kuning, les personnes travaillant autour du Dam Kuning gagnent plus que celles du site situé le long de la route de Cangkringan ; enfin, les travailleurs de Bronggang gagnent plus que ceux des autres sites de la Gendol. Le temps passé par jour sur les sites est révélateur de certaines pratiques. Si, dans tous les sites d'études, la plupart des travailleurs passent entre 6h et 10h par jour de travail, comme à Jambu-Kaliadem avant l'éruption, un pourcentage parfois assez important (entre 25% et 40%) reste moins de 6h. A Plumbon, 42% des travailleurs interrogés restent peu de temps sur le site à cause de leur provenance géographique souvent lointaine. Ils ne restent que le temps de remplir le camion. Les sites où des travailleurs restent plus de 10h sont surtout des sites à fréquentation locale (Kaliurang, Sudimoro, Pondokrejo, Sukorini). Le nombre de jours travaillés par semaine est plus aléatoire, et n'obéit pas vraiment à des logiques de répartition spatiale : les « effets de site » semblent moins évidents pour expliquer la grande variabilité des réponses obtenues. On peut simplement préciser que la plupart des travailleurs des sites très fréquentés viennent en moyenne 5 jours par semaine ; en revanche, sur les sites moins fréquentés (Pondokrejo, Sukorini), les personnes interrogées n'ont pas de rythme défini (respectivement 57% et 54% de « cela dépend » obtenus). En 2009, 81% des répondants déclaraient venir tous les jours à Jambu-Kaliadem pour travailler. Cette diminution relative du nombre de jours passés dans les carrières peut s'expliquer par la plus grande variété géographique des mineurs, mais aussi par la forte proportion de personnes possédant une double activité.

Compte tenu de ce rythme soutenu d'un travail physiquement exigeant, on n'est guère surpris que dans près de la moitié des sites d'enquête (7/15) plus de 60% des travailleurs se plaignent de douleurs physiques (98% à Pondokrejo, 95% à Kemiri, 81% à Sukorini). La plupart du temps, il s'agit de douleurs musculaires chroniques (qui ont été distinguées des courbatures), mais des difficultés respiratoires sont observées comme symptôme principal chez 27% des travailleurs à Bronggang, où la quantité de travailleurs et de camions soulève une grande quantité de matériaux fins. Les problèmes oculaires sont beaucoup moins fréquents, mais existent aussi (Bronggang notamment). Cependant, sur tous les sites, il est rare que les travailleurs aient l'habitude de consulter un médecin (100% de réponses négatives dans 9 sites). En l'absence d'un examen médical approfondi, ces résultats doivent évidemment être nuancés.

2.3 Encadrement socioéconomique

Il existe 4 types d'encadrement du travail pour obtenir des aides à la location des véhicules, d'éventuelles caisses communes de santé, ou du matériel de surveillance et d'alerte : les ONG (Jalin Merapi), les entreprises, les associations de travail et d'entraide informelles de groupes de travailleurs. Ceux qui demeurent indépendants ne bénéficient d'aucune aide, et peuvent même avoir du mal à s'intégrer. Sur l'ensemble des sites, un seul est largement encadré par une ONG (*Jalin Merapi*, voir chap. 4), à Jumoyo, village situé sur l'axe national Yogyakarta-Semarang dévasté par les lahars depuis janvier 2011, et qui a bénéficié d'une très forte couverture médiatique. Dans les autres sites, où les sinistres dus aux lahars ont eu une moindre ampleur, l'emprise des ONG est nulle. Les travailleurs de 7 sites sur 15 sont majoritairement encadrés par un système local de syndicats embryonnaires, correspondant à des groupes de travail et d'entraide. Dans 3 cas, à Sudimoro, à Cangkringan et à Balerante, l'ensemble des travailleurs interrogés est organisé ainsi. Cela n'est guère surprenant pour Sudimoro ou Balerante, qui sont des sites d'extraction historiques qui ont affermi leurs méthodes d'encadrement des travailleurs, mais étonne un peu plus pour la Kuning, d'autant que 92% des personnes interrogées sur ce site sont de nouveaux mineurs. Cela suggère en revanche la rapidité

d'organisation spontanée des communautés locales après une éruption. Les entreprises de commercialisation du matériel volcanique, basées à Yogyakarta ou à Semarang, sont assez faiblement représentées dans les sites d'extraction, excepté à Plumbon (49% des travailleurs) et à Bronggang (26%). En 2009 dans la Gendol (Jambu-Kaliadem), seuls 17% des répondants étaient salariés. Effectivement, dans les sites « anciens » de Kaliurang ou de Balerante, l'emprise des entreprises est toujours faible à nulle, tout comme dans les sites à faible rendement (Krasak ou Kuning aval). Enfin, les travailleurs indépendants sont très présents dans les sites réouverts après plusieurs années de fermeture : Srumbung, Pondokrejo, Kemiricilik et Kemiri, traduisant peut-être un certain relâchement des équipes traditionnelles.

2.4 Vente du matériel

La logique de répartition spatiale par « effet de site » est très visible pour la question 30b, qui s'intéresse aux lieux de vente des chargements (dans des magasins de revente ou directement à des chantiers dans le cas d'entreprises). Sans surprise, la proximité est le facteur d'explication principal : les sites de la Putih, de la Bebeng et de la Krasak vendent essentiellement à Magelang ; les sites de la Boyong et du Dam Kuning vendent dans la région de Yogyakarta, les sites de la Woro à Klaten et à Solo. Semarang est très bien représentée sur l'ensemble des sites, ce qui en fait le lieu de vente direct hors Merapi le plus important. Par ailleurs, les sites les plus rentables (Gendol) sont ceux qui disposent d'un rayonnement géographique très large : Plumbon a des sites de ventes répartis également sur l'ensemble du Merapi, mais aussi dans des agglomérations extérieures. Quant à Cangkringan, il est surprenant de remarquer combien son rayonnement est important pour un site de taille si modeste ; l'explication la plus plausible serait sa localisation avantageuse, située juste à côté de la route de Cangkringan qui effectue une boucle sur tout le versant sud du Merapi (Prambanan-Pakem-Yogyakarta), et rejoint rapidement les axes javanais nord-sud (axe Semarang-Yogyakarta) et est-ouest (axe Jakarta-Bandung-Surabaya). Les sites à lieux de vente plus exclusifs (Kemiricilik, Kemiri, Dam Kuning sur la Kuning) sont également les plus modestes.

2.5 Une régulation toujours mal appliquée

À la fin des années 2000, l'accès aux sites d'extraction était toujours soumis à certaines contraintes : péages situés le long des routes (Sleman), et/ou entrée payante aux sites (Gendol, Putih) avec réductions éventuelles pour les locaux (Gendol). Les sites n'étaient théoriquement accessibles qu'aux travailleurs munis de permis, règle que les gouvernements locaux n'ont jamais su faire appliquer. Suite à l'éruption de 2010 et aux profondes mutations observées, qui a exacerbé le caractère spontané des extractions, la situation s'est complexifiée. Les questionnaires montrent cependant une certaine variabilité de cette gratuité, très majoritaire dans la Putih, mais moins évidente ailleurs. Les premières observations semblent suggérer que les travailleurs locaux et indépendants bénéficient d'un accès gratuit aux sites, tandis que les salariés d'entreprise doivent s'acquitter d'un péage (10 000 Rp par camion, soit environ 1 euro). Les sites majoritairement payants sont ceux de Sudimoro (Bebeng) et de Plumbon (Gendol), soumis à une taxe communale pour tout travailleur externe à la commune, ce qui s'avère rentable lorsque bon nombre de travailleurs viennent d'agglomérations lointaines. La situation est également variable concernant les permis. Dans la plupart des cas, les travailleurs, spontanés, n'ont pas plus pris la peine de s'engager dans les procédures administratives requises pour obtenir le permis qu'ils ne le faisaient avant l'éruption. Dans 9 sites sur 15, personne ne possède le SIPD. Toutefois, la question précédente (22) qui demande s'il est obligatoire d'avoir ce permis pour creuser, donne des résultats moins tranchés : seuls les travailleurs de 4 sites donnent à 100% une

réponse négative. Le reste du temps, un faible pourcentage de personnes interrogées (< 25%) estime qu'il est nécessaire d'avoir le permis. Cependant, très peu ont fait des demandes : dans 11 sites, personne n'a entamé de procédures pour obtenir l'autorisation officielle de creuser. Dans les cas positifs, les pourcentages sont faibles (< 10%). Suite à l'éruption, il est peu probable que les contrôles et comptages officiels, déjà peu probants avant l'éruption – quand bien même les sites d'extraction étaient moins nombreux – aient continué de manière sérieuse. Un assouplissement de la législation en vigueur semble plausible, puisque les gouvernements locaux n'ont pas la possibilité de reprendre le contrôle sur une activité spontanée et désormais aussi étendue. Des fonctionnaires de Sleman et de Magelang, contactés régulièrement durant le premier semestre 2011, ont fait part de leurs hésitations quant à la conduite officielle à adopter : il semble que, durant un laps de temps indéterminé, l'obtention des permis soit suspendue, du moins assouplie. On n'oublie pas que dans certains cas, les extractions sont nécessaires à l'entretien de la voirie (Putih, Gendol), et sont donc encouragées par l'autorisation d'utiliser des moyens mécaniques auparavant prohibés. Cependant, deux sites doivent attirer notre attention, tous deux situés dans la Gendol : Bronggang et Plumbon. C'est à Bronggang que l'on trouve le plus de personnes possédant un permis officiel (37%), et où le plus de travailleurs estiment que le permis est obligatoire (46%), près d'un tiers ayant même commencé à le demander (31%). La situation est peut-être liée à l'ancienneté de certaines personnes interrogées qui travaillaient les années précédentes à Kopeng-Kaliadem, huit kilomètres en amont de la Gendol, et où le permis de creuser délivré par le district de Sleman était – théoriquement – obligatoire. Par ailleurs, beaucoup de travailleurs travaillent pour le bureau public qui supervise les opérations d'entretien public ; ils ont peut-être obtenu de cette manière cette licence (égalité des % question 25 et 23). Plus surprenant sont les réponses à la question 22 obtenues à Plumbon : 100% des personnes interrogées ($n=72$) déclarent qu'il est obligatoire d'avoir un permis, mais personne n'a encore entamé de procédures pour l'obtenir.

2.6 Aléas et risques

Les enquêtes ont révélé que dans tous les sites d'enquête, les connaissances fondamentales relatives aux aléas représentant un danger potentiel dans les sites d'extraction sont parfaitement acquises. L'ensemble des personnes qui travaillent dans les vallées, indépendamment de leur genre, de leur âge ou de leur ancienneté savent ce que sont des lahars, et en ont une bonne représentation (100% de bonnes réponses par site). Cependant, ces résultats doivent être nuancés par les réponses aux questions 18, 19 et 20. La question 18 concerne les systèmes d'alerte : dans 10 des 15 sites d'enquêtes, une ou plusieurs personnes munies de talkie-walkie (donnés par le gouvernement, par des ONG ou achetés individuellement, voir chap. 4) donnent l'alerte si un lahar a été détecté plus en amont dans la vallée (connexion au signal radio des pluviomètres et relais d'information d'amont en aval). Dans 3 sites, un certain nombre de travailleurs ont mal répondu à cette question, montrant qu'ils ne sont pas au courant des procédures d'alerte, et ignorant même si leur site était surveillé ou pas. Ce chiffre avoisine 23% des personnes interrogées à Pondokrejo, qui ne semblent pas beaucoup s'intéresser aux risques qu'elles peuvent encourir, sans grande distinction d'âge ou de genre. La question 20 s'intéresse directement aux expériences personnelles des travailleurs : ont-ils déjà observé un lahar ou non. Dans tous les sites, les réponses positives sont largement majoritaires, avoisinant fréquemment 100%. Ceux qui n'ont jamais assisté à un lahar sont surtout localisés dans la Bebeng, où la fréquence d'occurrence de l'aléa était moindre par rapport à d'autres bassins versants. Toutefois, dans la Gendol, où la fréquence d'occurrence était élevée, un certain nombre de travailleurs (17% et 19% à Plumbon et à Jambon) n'en ont jamais vu. Cela pourrait s'expliquer par la grande variété des provenances géographiques des travailleurs. La plupart de ceux qui ont répondu négativement à cette question

vivent loin, à Semarang, Sragen ou Kudus notamment. Il ne faut pas oublier que les lahars arrivent sur ces sites en fin d'après-midi, à une heure où ceux qui vivent le plus loin sont déjà repartis.

Plus révélatrice est la question 19, qui concerne la prise de risque : les travailleurs continuent-ils de creuser alors qu'il pleut sur le sommet au Merapi, et qu'un lahar est susceptible de survenir ? Sur 5 sites (Pondokrejo, Kemiri, Kemiricilik, Cangkringan, Opak-Gendol, Sukorini), la plupart des réponses sont positives. Il s'agit soit de vallées où les fréquences d'occurrences de lahars sont moindres (Krasak et Kuning), soit de sites situés en aval (17 à 20 km dans le cas de Sukorini ou de Confluent) où les lahars ne parviennent qu'épisodiquement. Il s'agit également, pour la Kuning, la Gendol, et la Woro, de sites où n'existe pas de système d'alerte spontané, ce qui peut limiter l'habitude d'avoir à s'arrêter en cas de danger. La prise de risque est plus difficile à caractériser à Kemiri. Le taux de prise de risque est certes légèrement moins marqué que pour les 4 autres sites (58% de réponses positives contre des taux > 70% dans les autres cas), mais les lahars y sont fréquents. Peut-être les travailleurs se sont-ils habitués à des événements peu intenses ; peut-être sont-ils aussi tout à fait avertis du laps de temps nécessaire à un lahar pour venir jusqu'au site (chap. 4, Figure 83). Dans tous les cas, ils sont au courant du danger, et acceptent le risque.

Le questionnaire de 2011 a permis de produire une information quantitative précieuse pour interpréter la manière dont l'activité d'extraction a pu s'adapter aux changements induits par l'éruption de 2010. Dans certains cas (vente du matériel, encadrement socioéconomique, régulation), les effets de site sont déterminants, et permettent de bien montrer les différences existant entre ces sites. D'autres éléments (méthodes de travail, caractéristiques des travailleurs, connaissance des aléas) semblent assez homogènes sur l'ensemble du Merapi. Les questionnaires ont mis en avant les nouveaux enjeux soulevés par l'exploitation des dépôts volcanogéniques après l'éruption de 2010.

- ***Des éléments n'ont pas changé : les travailleurs sont sensiblement les mêmes, avec des effectifs en légère baisse, mais surtout des sites de travail plus largement répandus autour du volcan. Les méthodes de travail sont également très largement identiques pour la plupart des travailleurs, avec le camion qui reste l'élément décisif des extractions. Les activités connexes (warung, ventes de boissons et collations) sont toujours autant répandues. Le warung qui régulait l'entrée au site de Jambu-Kaliadem est désormais situé au bord du site d'extraction de Plumbon. Enfin, l'ignorance plus ou moins délibérée de la loi continue d'être monnaie courante : l'activité a été et demeure avant tout spontanée, opportuniste, informelle, peut-être « vivrière ».***
- ***Des éléments nouveaux : la présence de pelleteuses dans les sites d'extraction est le principal élément nouveau, d'autant qu'elles sont parfois financées par les gouvernements de districts, qui ont dû revenir sur leur interdiction décidée dans les années 2000. En outre, la quantité importante de matériel déposé a amené l'autorisation d'exploiter les dépôts pendant la nuit également, une pratique qui avait été interdite aussi dans les années 2000. L'élargissement géographique, également, change considérablement les caractéristiques des sites d'extraction : chaque vallée, ou presque, est ainsi exploitée, contrairement à la situation d'avant l'éruption où seul le versant sud était le bassin d'activité principal.***
- ***Des éléments réactualisés : les dangers auxquels s'exposent les travailleurs tendaient à diminuer, avant l'éruption, compte tenu de la réduction de la fréquence d'occurrence des lahars. En revanche, cet enjeu a été ravivé après l'éruption de 2010. Les lahars sont plus fréquents (partie 2), et menacent chaque jour des milliers de travailleurs dans les vallées, lesquels sont parfaitement avertis des risques. Ainsi, le risque n'est pas vraiment subi, mais serait peut-être davantage pris, et représente une information fondamentale dans l'étude des risques liés aux lahars autour du Merapi.***

III. Évaluation des risques dans les sites d'extraction du Merapi

1. Comprendre la vulnérabilité dans les sites d'extraction

1.1 Les sites d'extraction et leur particularité spatiale : existe-t-il une vulnérabilité des travailleurs ?

Les sites d'extraction sont un type d'espace original, dont les modes de fonctionnement sont directement liés à la mobilité des personnes qui y travaillent, mais qui n'y résident pas. L'impact destructeur des aléas n'y est donc pas aussi lourd de conséquences que dans les zones habitées, mais le risque d'accidents n'en est pas moins absent. Les sites d'extraction regroupent des carrières situées de manière plus ou moins anarchique dans les corridors de lahars des rivières radiales du volcan (voir chap. 5 et chap. 6). Il ne s'agit pas de villages, mais d'espaces occupés de manière temporaire. De fait, l'évacuation pose *a priori* moins de problèmes, puisqu'en cas de lahars, les travailleurs ne laissent pas de maison et de biens matériels précieux derrière eux ; les dommages sur le bâti sont quasiment hors de propos puisqu'aucune maison ne s'y trouve.

La quantification du risque suppose la mesure de l'ensemble de ses facteurs (voir chap. 1 et 2), et notamment de la vulnérabilité. Toutefois, que signifie « être vulnérable » dans un espace tel que les sites d'extraction ? Le questionnaire a révélé que si des centaines de personnes se rendent tous les jours là où les lahars sont le plus susceptible de se produire, c'est parce que leur condition économique l'exige : l'exploitation des dépôts volcanoclastiques se développe en réponse aux perturbations causées par une éruption. D'autres facteurs plus structurels comme les forts taux de chômage dans les districts du Merapi contraignent également beaucoup de personnes à devenir mineurs. Les sites d'extraction sont ainsi l'expression de la vulnérabilité des habitants du Merapi, et les travailleurs apparaissent donc déjà vulnérables en eux-mêmes puisque contraints de s'exposer aux lahars. À cette cause profonde de vulnérabilité – qui explique d'ailleurs l'origine des sites d'extraction – s'ajoute une vulnérabilité secondaire, liée à la conduite des travailleurs en cas de lahars et au fonctionnement du site d'extraction (encadrement des mineurs, surveillance et système d'alerte...). Cette vulnérabilité secondaire – qui en réalité s'apparente plus à une exposition assumée aux aléas – apparaît très liée à la prise de risque : est ainsi « vulnérable » celui qui choisit de différer son départ en cas d'urgence ou lorsque les conditions de déclenchement des lahars sont réunies. La ressource contrebalance donc l'aléa. Ainsi, les travailleurs, qui sont tous fondamentalement vulnérables, ne sont pas menacés de la même manière par les lahars : certains auront des réactions adaptées et d'autres non. Il s'agit dès lors de discuter plus avant cet aspect de la vulnérabilité dans des espaces où l'aléa se combine à la ressource, et où la nécessité de remplir un chargement de sable peut être à l'origine de pertes humaines et de dommages élevés.

1.2 La prise de risque : un facteur de vulnérabilité fondamental

Pourquoi retarder le moment de l'évacuation ? La question est d'autant plus légitime que les lahars du Merapi ne se produisent plus par surprise et que tous les mineurs sans exception en connaissent les modes de déclenchement et d'écoulement. La prise de risque est un paramètre fondamental dans la compréhension des dangers dans les sites d'extraction : les deux morts à Pondokrejo en février 2011 ont été emportés par un lahar car ils avaient refusé de partir alors qu'il était encore temps. Il s'agit du comportement dangereux des travailleurs qui au lieu d'évacuer

continuent de travailler alors que le déclenchement d'un lahar est signalé ou probable (pluie au sommet du volcan). La question 19 du questionnaire a permis d'estimer la part de prise de risque volontaire dans les différents sites d'extraction, qui s'avère très variable (Tableau 38).

Tableau 38 - Prise de risque dans les sites d'extraction autour du Merapi. Pourcentages de réponses affirmatives par site issus du questionnaire (question 19).

Sites à prise de risque volontaire nulle	Sites à prise de risque existante	
Jumoyo Kaliurang Sudimoro Kemiricilik Plumbon Jambon Balerante	Prise de risque importante (> 70%)	Confluent Sukorini Cangkringan Pondokrejo
	Prise de risque moyenne (50-70%)	Kemiri
	Prise de risque peu élevée (< 50 %)	Srumbung Dam Kuning Bronggang

La compréhension de ce phénomène nécessite d'étudier plus précisément la valeur des relations qu'il entretient avec les autres caractères de l'étude statistique du questionnaire. Quels éléments de réponse sont fortement liés à la prise de risque, et permettraient d'apporter des pistes d'explication à la prise de risque volontaire ? Pour répondre à cette question, la valeur de la relation entre la prise de risque et une série de paramètres issus des questionnaires a été testée. Ont été choisis par hypothèse :

1.2.1 Les données personnelles

Le genre, l'âge et la provenance des travailleurs sont-ils des facteurs déterminants dans la prise de risque ? Les études de comportement des populations à risque ont souvent tendance à montrer les différences entre des populations de genre et d'âge différent (D'Ercole et Rançon, 1994 ; Barberi *et al.*, 2008), et on n'oublie pas que les femmes tendent à avoir une meilleure perception du danger lié aux lahars que les hommes (cf. chap. 4 I.2.3). Certainement probante dans le cas des populations urbaines hétérogènes, cette question se heurte ici à la grande homogénéité des travailleurs. L'échantillon interrogé ne montre que peu de différences de genre ou d'âge, mais l'hypothèse mérite néanmoins d'être testée. La provenance des travailleurs, beaucoup plus diversifiée, peut en revanche être un facteur d'explication convaincant : les personnes résidant au Merapi ont peut-être des conduites moins dangereuses que celles habitant hors de la région du volcan. Ces dernières, en effet, peuvent être moins habituées aux lahars (même si elles en ont déjà vu un), et surtout peuvent avoir des contraintes horaires qui leur impose de rester le plus longtemps possible sur place pour que soit complété leur chargement.

1.2.2 Le rapport à l'aléa et au danger

Il s'avère inutile de mettre en relation la prise de risque avec la connaissance fondamentale de l'aléa qui est excellente pour l'ensemble de l'échantillon interrogé. En revanche, d'autres éléments peuvent être des facteurs d'explication potentiels. D'abord, l'expérience propre des travailleurs : ceux qui prennent des risques sont-ils ceux qui sont habitués à se rendre dans les vallées du Merapi pour y exploiter les dépôts ? Font-ils ou non partie de ceux qui ont déjà observé à un lahar ? Enfin, la prise de risque est-elle plus forte sur les sites où existe une surveillance permanente des lahars ?

1.2.3 Les modes de travail

En fonction de la manière dont elles travaillent, les personnes interrogées se mettent-elles en danger, ou bien restent-elles prudentes ? En premier lieu, ceux pour qui les extractions ne sont qu'une activité de complément en plus d'un métier moins rémunérateur, mais plus officiel (agriculteur, chauffeur...) : cela les influe-t-il leur comportement face aux lahars ? L'encadrement extérieur (travailleurs membres d'un groupe ou non), l'organisation du travail dans les carrières (équipes fixes ou travailleurs isolés qui se regroupent de manière aléatoire), le nombre de jours et d'heures travaillés (régulier ou non), la fréquence de changement de site sont également des facteurs d'explication potentiels de la prise de risque. Enfin, les motivations pécuniaires sont évidemment à tester également : les travailleurs prennent-ils des risques si la rémunération à la clé est meilleure ? On n'oublie pas qu'ils sont payés au tonnage, et non de manière forfaitaire à la journée ou à l'heure. C'est l'hypothèse la plus vraisemblable d'explication de la prise de risque dans les vallées du Merapi. Par ailleurs, la gratuité ou non de l'accès à un site peut éventuellement entrer en ligne de compte : ceux qui payent l'entrée prennent-ils plus de risque ? Enfin, le lieu de vente du matériel est également un facteur d'explication à vérifier : le sable se vend plus cher dans les grandes agglomérations extérieures au Merapi que dans les *depo pasir* locaux.

Les questions concernant la régulation n'ont pas été prises en compte puisque celle-ci n'est globalement pas suivie ; ceux qui possèdent l'autorisation officielle sont généralement ceux qui travaillent dans des entreprises ou pour le gouvernement, ce qui rejoint l'encadrement de l'activité. La relation entre la prise de risque et ces différents caractères a été calculée à partir de tableaux de contingence et du test du khi² (χ^2), présentés en Annexe D.3.2.

1.3 Explication de la prise de risque

1.3.1 Résultat pour l'ensemble des sites d'enquêtes

Les résultats concernent l'ensemble des réponses au questionnaire, et les éléments propres à chaque site, quand ils ont pu être calculés, sont abordés ensuite. Le Tableau 39 donne la valeur du test du khi² sans distinction de site.

Les données personnelles des personnes interrogées ne permettent pas d'expliquer la relation avec la prise de risque. Une nuance à ce résultat mérite d'être apportée, car les genres de la population totale ne sont pas équilibrés (94% d'hommes et 6% de femmes), l'activité d'extraction étant essentiellement masculine. En revanche, les âges mais surtout les provenances sont beaucoup mieux distribués, et n'apparaissent pas liés à la prise de risque individuelle. On aurait pu s'attendre à ce que les personnes habitant hors du Merapi soient plus à même de prendre des risques (temps de trajet parfois très long pour arriver aux sites d'extraction), ce qui ne semble pas être le cas. La prise de risque est surtout corrélée aux autres catégories : les caractéristiques de l'activité d'extraction (corrélation pertinente pour 5 critères sur 9) ainsi que le rapport au danger (corrélation pertinente pour 3 critères sur 3).

Les modes d'encadrement des travailleurs jouent un rôle, avec une césure nette existant entre ceux qui sont encadrés par une structure (ONG, entreprise, groupement/syndicat) et ceux qui sont indépendants. Ces derniers tendent à être plus prudents que leurs collègues, une attitude corroborée par l'organisation du travail sur le site : les travailleurs isolés prennent moins de risque que ceux qui travaillent en équipe. L'effet de groupe pourrait être une explication : la cadence de travail à plusieurs peut être moins souple à arrêter brutalement. Les rythmes de travail (quotidiens et hebdomadaires) ne doivent pas être omis : ceux qui se rendent de manière irrégulière sur les sites sont plus prompts à se mettre en danger que ceux qui observent un emploi du temps plus strict (notamment à plus de 3 jours

par semaine sur les sites). Enfin, la fréquence de changement de site est elle-aussi corrélée à la prise de risque. Ceux qui sont fidèles à un site, et y travaillent souvent depuis plusieurs années, sont beaucoup plus prudents que ceux qui changent souvent de site.

Tableau 39 - Résultats du test du khi² pour l'ensemble des sites d'enquête

CATÉGORIES	CARACTÈRES	<i>p-value</i> (test du χ^2)	Relation avec la prise de risque
DONNÉES PERSONNELLES	Genre	0,837	Pas de relation
	Âge	0,857	Pas de relation
	Provenance	0,968	Pas de relation
RAPPORT AU DANGER	Expérience dans les carrières	< 0,0001	Relation
	Expérience d'aléas	< 0,0001	Relation
	Site surveillé	< 0,0001	Relation
ACTIVITÉ D'EXTRACTION	Double activité	0,137	Pas de relation
	Mode d'encadrement	0,000	Relation
	Organisation du travail	< 0,0001	Relation
	Nombre d'heures par jour	0,893	Pas de relation
	Nombre de jours par semaine	< 0,0001	Relation
	Fréquence de changement de site	< 0,0001	Relation
	Salaire quotidien	0,054	Pas de relation
	Gratuité du site	0,158	Pas de relation
	Lieu de vente	0,565	Pas de relation

En revanche, certains aspects du travail d'extraction ne semblent pas liés à la prise de risque ; curieusement, il s'agit essentiellement des aspects financiers liés à cette activité. On pouvait émettre l'hypothèse que la prise de risque aurait pu, en premier lieu, être motivée par l'argent, or il n'en est rien. La valeur des salaires quotidiens, la gratuité ou non d'un site, ainsi que le lieu de vente (d'autant plus bénéfique s'il est loin) ne sont pas corrélés à la prise de risque. De même, la présence d'une deuxième activité en parallèle des extractions (pour 60% des personnes interrogées) n'est pas liée à la prise de risque non plus. L'argent n'apparaît donc pas, pour l'ensemble de la population interrogée, corrélée à la prise de risque dans les sites d'extractions.

Au final, ce sont avant tout les contraintes liées à la structure du groupe de travailleurs sur le site d'extraction et les rythmes de travail qui entraînent ou non la prise de risque. La prise de risque n'est donc pas une pratique individuelle, mais un comportement conditionné par l'organisation du travail sur chaque site, la gestion de l'aléa, et n'est pas réductible à des paramètres sociaux et économiques de genre, d'âge ou de motivations salariales.

1.3.2 Quelques résultats par site

Pour compléter ces résultats, d'autres tableaux de contingence ont été réalisés pour chaque site d'enquête, afin d'observer d'éventuelles particularités locales. La règle d'application du khi² exige que les effectifs des tableaux soient supérieurs à 5. Or compte tenu de valeurs très différentes selon les sites d'enquête, il n'a pas été possible d'obtenir des tests probants pour chaque site. Dans la majeure partie des cas, des effectifs trop réduits ont empêchés de calculer l'intensité des relations entre la prise de risque et les autres caractères. En outre, sur certains sites, des conduites communes (100% de prise de risque ou 100% d'attitude prudente) n'ont pas permis ces tests.

À **Srumbung**, peu de personnes se mettent en danger (39% pour $n=44$). Ainsi, peu de contingences ont pu être calculées, mais chaque fois qu'elles ont pu l'être, les tests se sont avérés négatifs, y compris les rythmes et l'organisation du travail. En dépit d'une plus forte représentation féminine (34% de femmes, taux largement supérieur aux autres sites d'enquête), le genre n'est toujours pas lié à la prise de risque. Ceci confirme le cas général identifié plus haut.

À **Pondokrejo**, un grand nombre de personnes se met en danger (72% pour $n=53$). Les tests de contingence réalisés ont validé à l'échelle locale la moitié des relations identifiées sur l'ensemble de la population. Comme dans le cas général, l'ancienneté dans les carrières, les rythmes de travail, la fréquence de changement de site sont liées à la prise de risque, alors que le lieu de vente immédiat du matériel extrait reste indépendant. En revanche, sur ce site, la gratuité ou non de l'accès est corrélée à la prise de risque. Ceux qui payent (36% des personnes interrogées ici) ont tendance à plus se mettre en danger que ceux pour qui l'accès est gratuit.

À **Bronggang**, le faible pourcentage de mise en danger (23%) réduit considérablement les effectifs et a empêché d'effectuer de plus nombreux tests. Les deux qui ont pu être réalisés confirment à échelle locale une petite partie des exemples du cas général (mode d'encadrement corrélé à la prise de risque, alors que la double activité ne l'est pas).

Dans l'ensemble, les quelques tests réalisés à échelle des sites d'enquêtes n'ont pas montré de grande divergence avec le cas général. Une étude plus fine n'est pas possible à cette échelle locale des sites d'extraction, compte tenu d'effectifs parfois fort réduits qui empêchent l'analyse statistique bi-variée.

Comprendre la vulnérabilité dans les sites d'extraction, c'est commencer par vérifier combien sont ceux qui, en toute connaissance de cause, continuent de travailler alors qu'un lahar est susceptible de survenir, voire a été annoncé. L'ensemble des accidents ou incidents survenus dans les carrières sont dus à des travailleurs qui avaient attendu trop longtemps d'évacuer (voir chap. 6 et *supra* II. 1.3), surtout après l'éruption de 2010 puisque des systèmes de surveillance et d'information rudimentaires mais efficaces existent.

2. Évaluation du risque dans les sites d'extraction

L'analyse de la conduite des travailleurs a permis de comprendre certains aspects liés à la prise de risque volontaire dans les sites d'extraction. Les éléments explicatifs de cette conduite dangereuse, la première responsable de surexposition au danger dans les sites d'extraction, peuvent être établis comme les premiers éléments vulnérabilisants, fragilisant dans chaque site d'extraction les travailleurs face aux lahars.

2.1 Évaluation de la vulnérabilité

2.1.1 **Éléments retenus**

En plus de la prise de risque détaillée plus haut, ont été choisis également l'ensemble des caractères qui l'expliquent et lui sont liées, regroupés en trois catégories : relation des travailleurs au danger, expérience et méthodes de travail dans les sites d'extraction, encadrement et contexte socio-économique des travailleurs (Tableau 40). En fonction du pourcentage de réponses du questionnaire aux différentes modalités de chacun des éléments vulnérabilisants potentiels retenus, des valeurs seuils ont été choisies afin de produire des classes de réponses les plus discriminantes et homogènes possibles. Les seuils permettent de distinguer, pour chaque site, si l'indice choisi est fortement, faiblement ou aucunement vulnérabilisant, et détermine ensuite l'attribution d'un score. Celui-ci varie

selon l'importance du facteur de vulnérabilité pour l'ensemble des éléments vulnérabilisants. La prise de risque volontaire, qui amène les travailleurs à ne pas tenir compte de la forte probabilité de l'aléa et donc à en subir davantage la menace est dotée du coefficient le plus élevé (30) : c'est la première cause d'accidents et d'incidents dans les vallées où les lahars ne surviennent plus par surprise. À ce titre, le système d'alerte et son efficacité ont été évalués sur 20 : l'absence de toute structure de surveillance affaiblit les travailleurs face aux aléas qu'ils ont moins le temps d'anticiper. En outre, les réponses erronées quant à la présence ou non d'une ou plusieurs personnes en charge de donner l'alerte permettent de distinguer les sites où les travailleurs sont au courant de la procédure, et ceux où manifestement ils l'ignorent, ce qui peut conduire à des malentendus et à des retards qui favorisent les accidents. De fait, la fréquence de changement de sites d'extraction de la part des travailleurs a également été considérée comme l'un des éléments essentiels de vulnérabilité, en distinguant les sites où la majorité est globalement fidèle au même poste et donc est habituée au fonctionnement des carrières, et ceux où la part des travailleurs plus mobiles excède les 40%. Enfin, l'expérience dans les sites d'extraction a été considérée comme un facteur important : les nouveaux travailleurs ont tendance à minorer l'impact des lahars, et à ne pas tenir compte immédiatement des alertes. Les autres facteurs de vulnérabilité ont été tous fixés à 5, et regroupent les méthodes de travail et l'encadrement de l'activité. Les éléments peu discriminants ont également été évalués à 5, notamment l'expérience de l'aléa lahar parmi les travailleurs, qui est très importante sur chaque site, et ne permet pas de montrer des nuances flagrantes. La fréquentation retenue est celle du nombre de jour par semaine. L'ensemble de ces éléments représente un tiers du score total maximal, qui est, pour chaque site d'enquête, évalué à 100. Un score égal ou proche de 100 dénote l'abondance d'éléments vulnérabilisants, tandis qu'un score qui tend vers 0 suggère la faible importance.

2.1.2 Éléments écartés

Les questions de connaissance et de perception des aléas sont hors de propos ici, dans la mesure où les personnes qui ont répondu au questionnaire ont montré qu'elles différenciaient bien les différents aléas volcaniques, et qu'elles en connaissaient la portée dangereuse. D'autres aspects du questionnaire n'ont pas été choisis car ils sont liés à l'organisation générale des sites d'extraction sans pour autant dévoiler des informations de vulnérabilité pertinente. Ainsi, le thème D du questionnaire (Réglementation des extractions) n'a été presque pas utilisé, mis à part la question 25 sur l'encadrement des travailleurs. De même, le thème F sur les réseaux de vente ne proposait pas d'information sur des éléments susceptibles de révéler une quelconque fragilité des travailleurs face aux aléas. Enfin, les questions relatives à la vente et au salaire n'ont pas été choisies comme facteur de vulnérabilité, dans la mesure où elles ne semblent guère expliquer les comportements, notamment la prise de risque, et n'apparaissent donc que peu révélatrices des éléments vulnérabilisants qui sont ici caractérisés.

2.1.3 Les indices de vulnérabilité

Le Tableau 40 présente les indices de vulnérabilité pour chaque site d'enquête. Les scores maximaux atteignent $V = 75$ pour Pondokrejo (Krasak) et Opak-Gendol (aval de la Gendol), et un premier ensemble de sites très vulnérables peut être délimité pour un indice de vulnérabilité $V > 60$ avec Sukorini (Woro) et Cangkringan (Kuning). Dans la plupart des cas, à part la Krasak où un seul site existe sur la vallée, il s'agit des localisations situées les plus en aval. Sur tous ces sites, la proportion de travailleurs continuant de creuser alors qu'un lahar est susceptible de se produire est très élevée. La connaissance du système d'alerte est très mauvaise à Cangkringan, mais l'encadrement des travailleurs est bien meilleur que dans les autres sites vulnérables. De même, les

Tableau 40 - Détail du calcul de la vulnérabilité par site (seuils déterminés d'après les réponses au questionnaire 2011)

						PUTIH		BEBENG		KRASAK	BOYONG		KUNING		GENDOL				WORD	
Facteur de vulnérabilité potentiel	Item du questionnaire	Intensité	Seuils d'après les réponses au questionnaire	Vulnérabilité	Score	SRUMBUNG	JUMOYO	KALIURANG	SUDIMORO	PONDOKREJO	KEMIRICILIK	KEMIRI	DAM KUNING	CANGKRINGAN	BRONGGANG	PLUMBON	JAMBON	OPAK-GENDOL	BALERANTE	SUKORINI
Prise de risque	Question 19	Elevée	≥ 70% prennent des risques	FORTE	30	15	0	0	0	30	0	15	15	30	15	0	0	30	0	30
		Moyenne	]0%;70%[	MOYENNE	15													
		Nulle	0%	NULLE	0															
Système d'alerte	Observations de terrain	Absence	Observations de terrain	FORTE	10	0	0	10	0	0	0	0	0	10	0	0	10	10	0	10
		Présence	Observations de terrain	NULLE	0															
Ignorance du système d'alerte	Question 18	Ignorance importante	≥ 20%	FORTE	10	5	0	5	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Ignorance modérée	]0%;20%[	MOYENNE	5													
		Système d'alerte connu	0%	NULLE	0															
Expérience dans les sites d'extraction	Question 10	Faible	≥ 75% de nouveaux	FORTE	10	10	5	0	0	5	5	10	10	10	5	5	0	10	5	5
		Modérée	]50%-70[	MOYENNE	5													
		Très Bonne	< 50%	NULLE	0															
Proportion de travailleurs qui changent de site d'extraction	Question 9	Importante	≥ 40% changent de site	FORTE	10	5	10	5	0	10	5	5	5	5	5	10	5	5	5	10
		Modérée	]0%;40%[	MOYENNE	5													
		Pas de changement	0%	NULLE	0															
Expérience de l'aléa lahar parmi les travailleurs	Question 20	Expérience inégale	≤ 90% ont assisté à un lahar	FORTE	5	2,5	0	5	5	0	5	2,5	2,5	2,5	2,5	5	5	2,5	2,5	0
		Bonne expérience	]90%;100%[	MOYENNE	2,5													
		Excellente	100%	NULLE	0															
Fréquentation du site d'extraction	Question 27	Irrégulière	≥ 50%	FORTE	5	0	0	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5
		Régulière	< 50%	NULLE	0															
Proportion de travailleurs isolés	Question 7	Importante	≥ 40% isolés	FORTE	5	5	5	2,5	0	2,5	2,5	2,5	2,5	0	2,5	0	2,5	2,5	0	2,5
		Modérée	]0%;40%[	MOYENNE	2,5													
		Pas de travailleurs isolés	0%	NULLE	0															
Encadrement des travailleurs	Question 25	Faible	≤ 50% sont encadrés	FORTE	5	5	0	2,5	0	5	5	5	2,5	0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	5
		Modéré	]50%;100%[	MOYENNE	2,5													
		Encadrement total	100%	NULLE	0															
Provenance des travailleurs	Question 4	Hétérogène	≤ 75% du même lieu	FORTE	5	0	0	0	5	5	0	0	0	5	0	5	5	5	0	5
		Homogène	> 75% du même lieu	NULLE	0															
Dépendance à l'activité d'extraction-Monoactivité des travailleurs	Question 11	Largement dépendante	≥ 50% dépendent des extractions	FORTE	5	5	5	0	2,5	2,5	2,5	2,5	0	5	5	5	2,5	2,5	2,5	0
		Moyennement dépendante	]25%;50%[	MOYENNE	2,5													
		Peu dépendante	< 25%	NULLE	0															
VALEUR DES ELEMENTS VULNERABILISANTS						52,5	25	35	12,5	75	25	42,5	37,5	67,5	37,5	32,5	32,5	75	17,5	72,5

travailleurs y ont une fréquentation plus régulière, et travaillent tous en équipe, à l'inverse de Pondokrejo, Confluent et Sukorini. Les scores de vulnérabilité compris entre 35 et 60 regroupent des sites où la prise de risque existe, sans atteindre les proportions du premier ensemble vulnérable. Les principaux éléments qui affaiblissent les personnes travaillant dans ces sites sont d'abord la proportion assez élevée de travailleurs récents, mais aussi des lacunes dans les structures d'encadrement (présence de travailleurs isolés, absence d'équipes et d'une cohésion de groupe). Les sites les moins vulnérables sont, *a contrario*, ceux où la prise de risque volontaire est forcément, absente, et où les systèmes d'alerte existent et sont bien compris par les travailleurs. Dans l'ensemble, les différents facteurs de vulnérabilités se combinent différemment pour chacun de ces sites. Ceux que l'on retrouve sur la quasi-totalité des sites sont la proportion de travailleurs qui ont l'habitude de changer de sites d'extraction, la dépendance exclusive à l'activité d'extraction, l'ancienneté dans les sites, l'expérience de l'aléa. En revanche, la méconnaissance du système d'alerte ou l'irrégularité de la fréquentation sont moins bien représentées.

2.2 Méthode d'évaluation des enjeux E

La question des risques dans les sites d'extraction nécessite d'accorder ensuite une importance toute particulière à la question des enjeux propres à chaque localisation. La valeur des éléments exposés ainsi que leur nombre influent forcément sur le risque de catastrophe. Les enquêtes qualitatives menées tout au long de la thèse ont permis de dresser un bilan précis des éléments structurants des sites d'extraction représentant un capital humain et financier dont la perte pourrait s'avérer dommageable. L'analyse des enjeux, les « catalyseurs de vulnérabilité » (Leone et Vinet, 2006), repose sur une évaluation coûts-bénéfices dont le but est de pouvoir estimer la portée des dégâts susceptibles d'être produits par un lahar. Pour chaque site d'enquête, les enjeux ont ainsi définis selon des seuils issus des observations de terrain, et auxquels ont été attribués des coefficients (Tableau 41) :

2.2.1 Les pertes humaines potentielles

La fréquentation quotidienne d'un site d'extraction permet d'évaluer le nombre potentiel de personnes exposées aux aléas. La disparité entre les sites se révèle particulièrement flagrante entre ceux de la Gendol où le seuil de 400 travailleurs par jour est franchi, et ceux de la Kuning ou de la Boyong où les fréquentations demeurent peu élevées.

2.2.2 Les pertes matérielles potentielles

La présence plus ou moins importante de ces camions, excavateurs ou pelleteuses sur les sites d'extraction joue sur les enjeux puisque l'ensemble de ces outils mécaniques représentent un coût financier lourd. Le lahar du 22 mars 2011, par exemple, a emporté trois pelleteuses à Jambon (Gendol), ce qui a causé la perte de plusieurs dizaines de millions de roupies que ne compensent pas les bénéfices quotidiens des travailleurs, estimés à environ 2 millions de roupies au total (pour une moyenne de 43 travailleurs quotidiens rémunérés à environ 40 000 Rp par jour sur ce site). En outre, la présence de véhicules nombreux sur les sites d'extraction risque d'encombrer les voies de circulation en cas d'évacuation ; les embouteillages sont les premières causes d'abandon de véhicules. Des dizaines de camions se sont retrouvés bloqués dans la Gendol lors des lahars survenus après l'éruption de 2006 (revue de presse, *KR*, 23 décembre 2006, 24 février 2007, 20 avril 2007, 4 novembre 2008, 20 avril 2009) et de 2010 (Figure 161). Enfin, les enjeux dans les sites d'extraction sont également révélés par la présence de *warung* (magasins d'approvisionnement et restaurants, voir chap. 6). Bâti

de bambous, très fragiles face aux lahars, ils sont malgré tout le noyau social où se rencontrent les travailleurs durant leur pause (De Bélizal *et al.*, 2011). Mise à part la structure principale, tendue d'une bâche de toile la plupart du temps, l'aménagement du *warung* est transportable : aucune denrée n'y est conservée, la vaisselle et le gaz sont apportés quotidiennement par les propriétaires. Ceux-ci sont des habitants des villages riverains de la vallée, pour lesquels la perte du *warung*, si elle n'est pas dramatique étant donné que les richesses principales du magasin sont faciles à mettre hors de portée lorsqu'est signalé un lahar, représente quand même un manque à gagner de quelques jours, le temps de nettoyer et de réparer la structure. Leur présence contribue aussi à saisir l'importance des enjeux sur les différents sites d'extraction, entre ceux où trois à quatre *warung* sont recensés (Plumbon), et ceux où il n'y en a pas (Srumbung). Toutefois, leur souplesse d'aménagement et de déplacement n'en fait pas des enjeux primordiaux ; aussi, leur poids est-il minoré dans l'évaluation globale des enjeux (1/10).



Figure 161 - Camion piégé par un lahar au site d'extraction de Plumbon, février 2011
(cliché Mas Ari, février 2011)

2.2.3 L'évaluation des enjeux

Les enjeux ont été évalués sur une échelle de 2 (enjeux faibles) à 10 (enjeux très élevés, valeur maximale de l'indice d'enjeu), prenant en compte la fréquentation de population et la présence de biens et d'outils matériels susceptibles d'être endommagés (Tableau 41). Six sites ont des enjeux évalués à $E = 4,5$ selon un schéma similaire : faible présence humaine et de camions, moins de 5 pelleteuses, et un seul *warung*. En revanche, certains sites d'extraction ont des enjeux particulièrement élevés : les sites de la Gendol sont ceux où les enjeux sont maximaux, dus à une fréquentation très élevée de travailleurs et de véhicules, associés à un grand nombre de *warung*. À Bronggang et à Plumbon, les enjeux atteignent ainsi $E = 10$ (Tableau 41). Enfin, les sites d'extraction où les enjeux sont réduits ($< 0,4$) sont ceux d'où les pelleteuses et les *warung* sont absents.

Tableau 41 - Détail du calcul des enjeux par site (seuils déterminés d'après les réponses au questionnaire de 2011)

				PUTIH		BEBENG		KRASAK	BOYONG		KUNING		GENDOL				WORD	
				SRUMBUNG	JUMOYO	KALIURANG	SUDIMORO	PONDOKREJO	KEMIRICILIK	KEMIRI	DAM KUNING	CANGKRINGAN	BRONGGANG	PLUMBON	JAMBON	OPAK-GENDOL	BALERANTE	SUKORINI
Fréquentation de travailleurs	Elevée	> 400	3	1	2	1	2	1	1	1	1	1	3	3	1	1	2	1
	Modérée	[100;400[	2														
	Faible	< 100	1															
Fréquentation de camions	Elevée	>100	3	1	2	1	2	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1
	Modérée	[50;100[	2														
	Faible	< 50	1															
Présence de pelleteuses	Elevée	> 5	3	0	2	2	0	2	2	2	2	0	3	3	3	2	2	0
	Modérée	[1;5]	2															
	Absence	0	0															
Présence de warung	Beaucoup	> 3	1	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	0	0	0,5	0
	Peu	[1;3]	0,5															
	Absence	0	0															
TOTAL				2	6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	2	10	10	5	4	5,5	2

Tableau 42 - Synthèse du calcul du risque pour chaque site

SITES	Vulnérabilité <i>V</i> (/100)	Enjeux <i>E</i> (/10)	Fréquence d'aléas <i>A</i> (/1)	RISQUE <i>R</i> = <i>V</i> × <i>E</i> × <i>A</i>		TYPES	ANALYSE
Bronggang	37,5	10	0,092	34,5	RISQUE TRÈS ÉLEVÉ	GENDOL	SITES DANGEREUX
Plumbon	32,5	10	0,092	29,9			
Opak-Gendol	75	4	0,092	27,6			
Jumoyo	25	6	0,183	27,5			
Srumbung	52,5	2	0,183	19,2	RISQUE ÉLEVÉ	PUTIH	
Kemiri	42,5	4,5	0,1	19,1			
Jambon	32,5	5	0,092	14,95	RISQUE MODÉRÉ	KRASAK	
Pondokrejo	75	4,5	0,042	14,2			
Kemiricilik	25	4,5	0,1	11,3			
Dam Kuning	37,5	4,5	0,042	7,1	RISQUE FAIBLE	KUNING	SITES PEU DANGEREUX
Cangkringan	67,5	2	0,042	5,7			
Kaliurang	35	4,5	0,025	3,9			
Sudimoro	12,5	4,5	0,025	1,4			
Sukorini	72,5	2	0,004	0,6	RISQUE TRÈS FAIBLE	WORO	
Balerante	17,5	5,5	0,004	0,4			

2.3 Méthode d'évaluation du risque R

2.3.1 Méthode de calcul de la valeur du risque R

Une fois les premiers facteurs de risque évalués (vulnérabilité V et enjeux E), l'association avec le facteur aléa A doit être opérée pour produire la valeur de risque final. La valeur retenue est la fréquence statistique, calculée pour chaque vallée d'après le nombre d'occurrences de lahars sur l'ensemble de la période pendant laquelle ils ont été observés (du 26 octobre 2010 au 1^{er} mai 2011, voir partie 2).

Le produit des facteurs A , V et E donne la valeur de risque R , dont le maximum possible est la valeur 1000 si $V_{\max} = 100$, $E_{\max} = 10$ et $A_{\max} = 1$. La variabilité des différents facteurs du risque produit des valeurs R comprises entre 0,4 et 34,5, assez bien réparties sur l'ensemble de cet intervalle.

2.3.2 Première classification et typologie : sites dangereux, sites peu dangereux

L'ensemble des valeurs de risque obtenues pour chaque site permet d'effectuer un classement (Figure 162), représenté par ordre décroissant dans le Tableau 42. Plusieurs classes ont ensuite été délimitées, mettant en relation la valeur des différents facteurs du risque, en suivant l'ordre décroissant de la valeur R . Le classement met ainsi en évidence cinq types, qui ont été nommés soit en fonction de la rivière qui y est la plus représentée, soit en fonction de la rivière du premier site qui s'y trouve inclus (Tableau 42 et Tableau 43).

Tableau 43 - Détail et explication de la typologie des sites d'extraction face au risque

TYPE	VALEUR DU RISQUE R	ÉLÉMENTS EXPLICATIFS	SITES CONCERNÉS
« GENDOL » Risque très élevé	$R \geq 20$	Enjeux très élevés Vulnérabilité moyenne à très élevée Aléas fréquents	Bronggang Plumbon Opak-Gendol Jumoyo
« PUTIH » Risque élevé	$15 \leq R < 20$	Aléas très fréquents Enjeux moyens Vulnérabilité faible à moyenne	Srumbung Kemiri
« KRASAK » Risque modéré	$10 \leq R < 15$	Aléas peu à moyennement fréquents Enjeux modérés Vulnérabilité modérée à très élevée	Pondokrejo Jambon Kemiricilik
« KUNING » Risque faible	$1 \leq R < 10$	Vulnérabilité faible à élevée Aléas peu fréquents Enjeux faibles à modérés	Dam Kuning Cangkringan Kaliurang Sudimoro
« WORO » Risque très faible	$R \leq 1$	Aléas très faibles Vulnérabilité très faible Enjeux faibles à modérés	Balerante Sukorini

Les valeurs de risque les plus fortes sont celles des sites type Gendol, à aléas fréquents et enjeux maximum ou à vulnérabilité très élevée (Tableau 42 et Tableau 43). Le type Putih présente un autre cas de figure où le risque demeure élevé : à Srumbung à cause d'une forte fréquence d'occurrence des lahars qui, en 2010-2011, se sont produit à un rythme d'environ deux par semaine ; à Kemiri à cause d'enjeux et de vulnérabilité moyens. Le dernier type de sites à risque est représenté par

l'aval de la Krasak, de la Boyong et de la Gendol. La valeur du danger y est considérée comme « modérée » en raison de valeurs de vulnérabilité, d'enjeux et de fréquence d'aléas moyennes, à l'exception de la vulnérabilité qui, dans le cas de Pondokrejo (Krasak) est très importante.

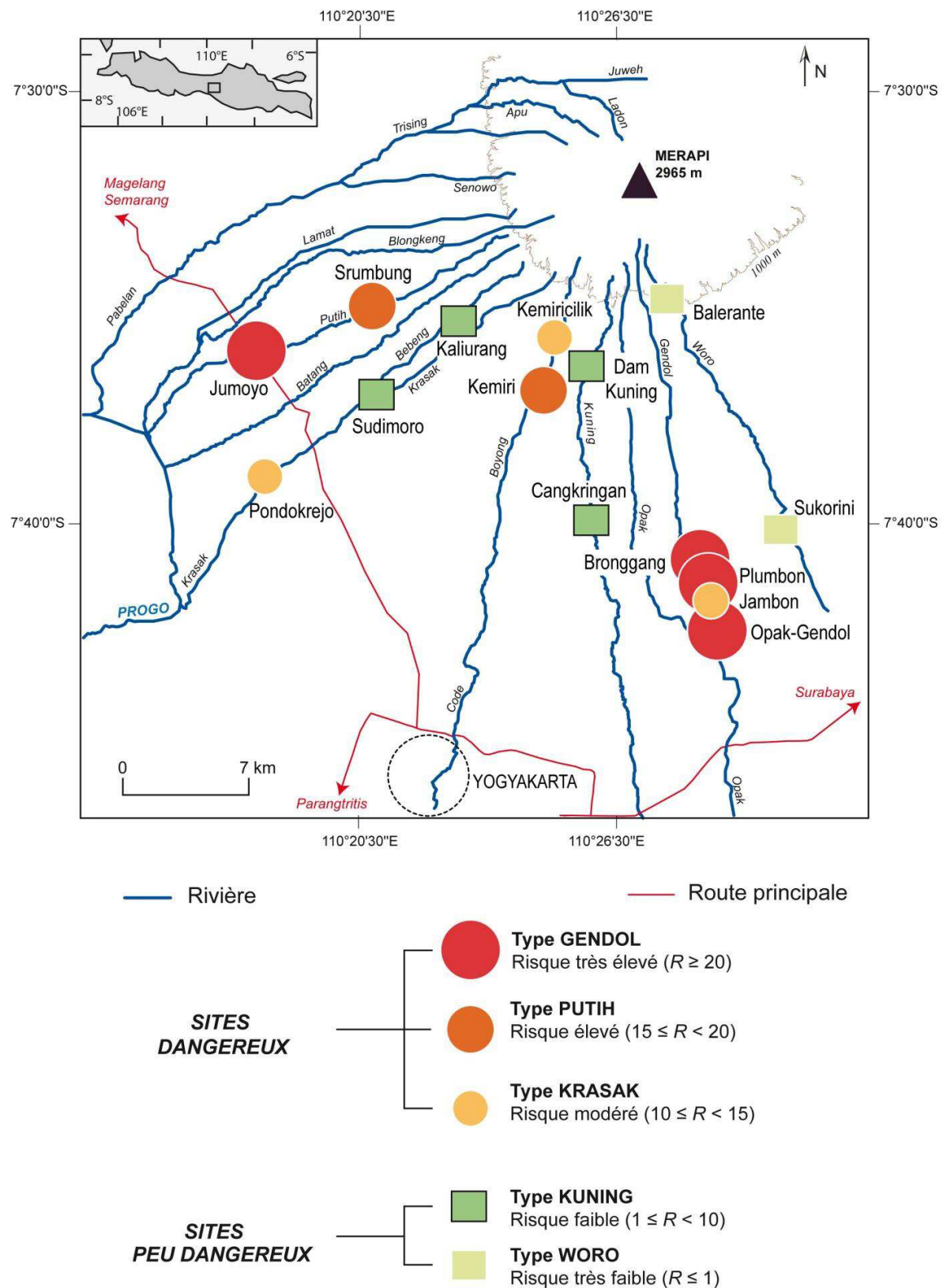


Figure 162 - Cartographie des risques dans les sites d'extraction au Merapi après l'éruption de 2010 (premier semestre 2011)

Enfin, les deux derniers types « Kuning » et « Bebeng » regroupent des sites considérés à risque faible voire très faible ($R < 10$), principalement à cause d'enjeux peu importants, associés à des aléas dont l'occurrence est faible. La vulnérabilité des travailleurs a beau y être élevée, la valeur finale du danger est nuancée par la faiblesse des autres facteurs du risque, rendant le risque moins fort que sur les sites du type Gendol, Putih ou Boyong. La différence est encore plus nette avec les sites du type Woro ($R < 1$), où la fréquence d'occurrence des lahars est très faible : ainsi, Sukorini a beau avoir l'une des valeurs de vulnérabilité les plus élevées ($V = 72,5$), le danger y demeure très faible compte tenu de lahars quasi-absents dans la Woro ($A = 0,004$).

La classification proposée (Figure 162 et Tableau 43) correspond dans les grandes lignes à la situation qui a pu être observée dans les sites d'extraction de la fin 2010 jusqu'au début 2012. Les principaux accidents ont été recensés dans la Gendol et dans la Putih, identifiées comme les deux principales rivières à risque : 3 pelleteuses (mars 2011) et une dizaine de camions (novembre 2011) ont été emportés dans la Gendol, 6 camions emportés dans la Putih en novembre 2011. Un travailleur a été tué en février 2011 et, à la fin du mois de janvier 2012, deux camions ont disparu dans la Krasak à Pondokrejo, identifié comme l'un des deux sites où la vulnérabilité est maximale. Le classement établi par la méthode d'évaluation quantitative progressive des risques détaillée ci-dessus peut servir de moyen d'étude pour mesurer le danger de chaque site d'extraction autour du Merapi.

2.3.3 Seconde classification : vers un outil de réduction des risques à micro-échelle

Tableau 44 - Exemple d'utilisation du détail des facteurs du danger pour réduire les risques dans les sites d'extraction

PRINCIPAL FACTEUR DE DANGER	MOYENS DE RÉDUCTION DES RISQUES	SITES
Vulnérabilité	1. Information et partage d'expérience	Opak-Gendol
		Pondokrejo
		Kemiri
		Srumbung
	2. Mise en place d'un système d'alerte	Opak-Gendol
Enjeux	3. Amélioration du système d'alerte	Pondokrejo
	4. Aménagement de voies de sortie spécifiques	Bronggang
		Plumbon
	5. Installation de voies spéciales et de garages pour pelleteuses	Bronggang
		Jambon
		Jumoyo
Aléas	6. Limite de fréquentation maximale à déterminer	Bronggang
		Plumbon
	7. Incision artificielle du lit mineur et construction de berges pour le lit majeur	Srumbung
		Jumoyo
		Bronggang
		Plumbon
		Jambon

L'ensemble des sites d'extraction dans les vallées du Merapi ne sont pas dangereux de la même façon. Les estimations successives de vulnérabilité, d'enjeux puis de risque ont montré une grande variabilité de critères qui produisent plusieurs paramètres qu'il convient de différencier.

L'intérêt d'une approche progressive dans l'évaluation des risques réside effectivement dans l'analyse préalable de l'ensemble des facteurs du risque, qui permet de cibler très vite les éléments à corriger pour une réduction des risques efficace et adaptée à la singularité de chaque site (Tableau 44). Après avoir classé les sites en fonction de leur valeur de risque propre, une deuxième classification peut être réalisée à partir des sites classés « dangereux » en identifiant leur principal facteur de danger. Des propositions d'action adaptées à leurs besoins spécifiques peuvent ensuite être proposées dans l'optique d'une réduction des risques ciblée.

Ainsi, à Pondokrejo, Opak-Gendol et Kemiri, l'action doit-elle avant tout se focaliser sur la réduction de la vulnérabilité. Le chapitre 6 a montré combien les tentatives de gestion *top-down* de l'activité se sont révélées inadaptées, et comment son informalité lui procurait la souplesse nécessaire pour s'adapter sans avoir à tenir compte d'un cadre juridique quelconque. Il faut alors fournir un travail de partenariat qui donne aux communautés concernées l'entière gestion de cet propre espace. Aussi, l'information et le partage d'expérience sont-ils le moyen le plus à même de produire les résultats escomptés. Sur les sites où les travailleurs sont hétérogènes (Pondokrejo et Confluent), et dont l'expérience n'est pas encore particulièrement développée, et surtout où la prise de risque est maximale, de tels efforts d'information, de réunion, de concertation, devraient favoriser la diffusion de connaissances précieuses. Si tous connaissent le mode de déclenchement des lahars et leurs caractéristiques principales, tous ne semblent pas les craindre, et semblent négliger les blessures qu'ils peuvent infliger. Enfin, sur certains sites, le système d'alerte est à repenser : il doit être amélioré, voire complètement mis en place afin d'apporter un gage de sécurité supplémentaire.

Dans la Gendol, les enjeux posent problème, et doivent être mieux protégés. L'amendement des réseaux d'accès serait une réponse adaptée à ce facteur de risque. Les défauts des routes empêchent très largement la protection optimale des travailleurs, des véhicules, des pelleteuses. Prévoir des chemins de sortie spécifiques pour les camions permettrait d'éviter l'engorgement des centaines de véhicules sur les voies principales. De même, les pelleteuses devraient avoir leurs propres voies d'accès et des espaces de garages situés plus en retrait de la zone d'expansion des lahars. Le corridor des lahars est suffisamment large entre Bronggang et Opak-Gendol pour permettre de tels aménagements qui existent d'ailleurs déjà à l'état embryonnaire à Plumbon, mais qu'il faudrait officialiser et surtout rationaliser sur l'ensemble des sites de la Gendol, voire de la Putih. Enfin, une limite de fréquentation quotidienne serait certainement une mesure de sécurité supplémentaire pour éviter une surpopulation problématique, notamment dans les heures de l'après-midi où les lahars ont tendance à s'écouler, et où l'évacuation s'avère particulièrement difficile et dangereuse. Malgré tout, il faut être conscient qu'une telle mesure nécessite un encadrement qui a de grandes chances de ne pas pouvoir s'adapter aux réalités de l'activité d'extraction.

Enfin, dans la Putih, la fréquence d'occurrence particulièrement importante des aléas représente l'élément majeur de danger, nécessitant une surveillance plus accrue que pour les autres bassins-versants où la récurrence est moindre. S'il n'est pas possible d'empêcher les lahars de se produire, il demeure possible d'en limiter l'intensité. Les mesures évoquées dans le Tableau 44 ont déjà commencé à être mise en œuvre dès la fin de la saison des pluies 2010-2011, grâce à des travaux de consolidation de berges et d'incision du chenal principal pour d'une part canaliser les flux de lahars, et d'autre part éviter les défluviations qui menacent les villages, les cultures et les routes. De nouveaux sabo-dams commencent également à être reconstruits pour stopper les blocs et briser, en amont, l'énergie des écoulements afin d'en limiter l'épaisseur et le débit en aval. À Srumbung, toutefois, les travailleurs ont tendance à adopter des conduites dangereuses ; en plus d'une gestion de l'aléa, des tentatives de réduction de la vulnérabilité sont également nécessaires pour assurer une meilleure sécurité.

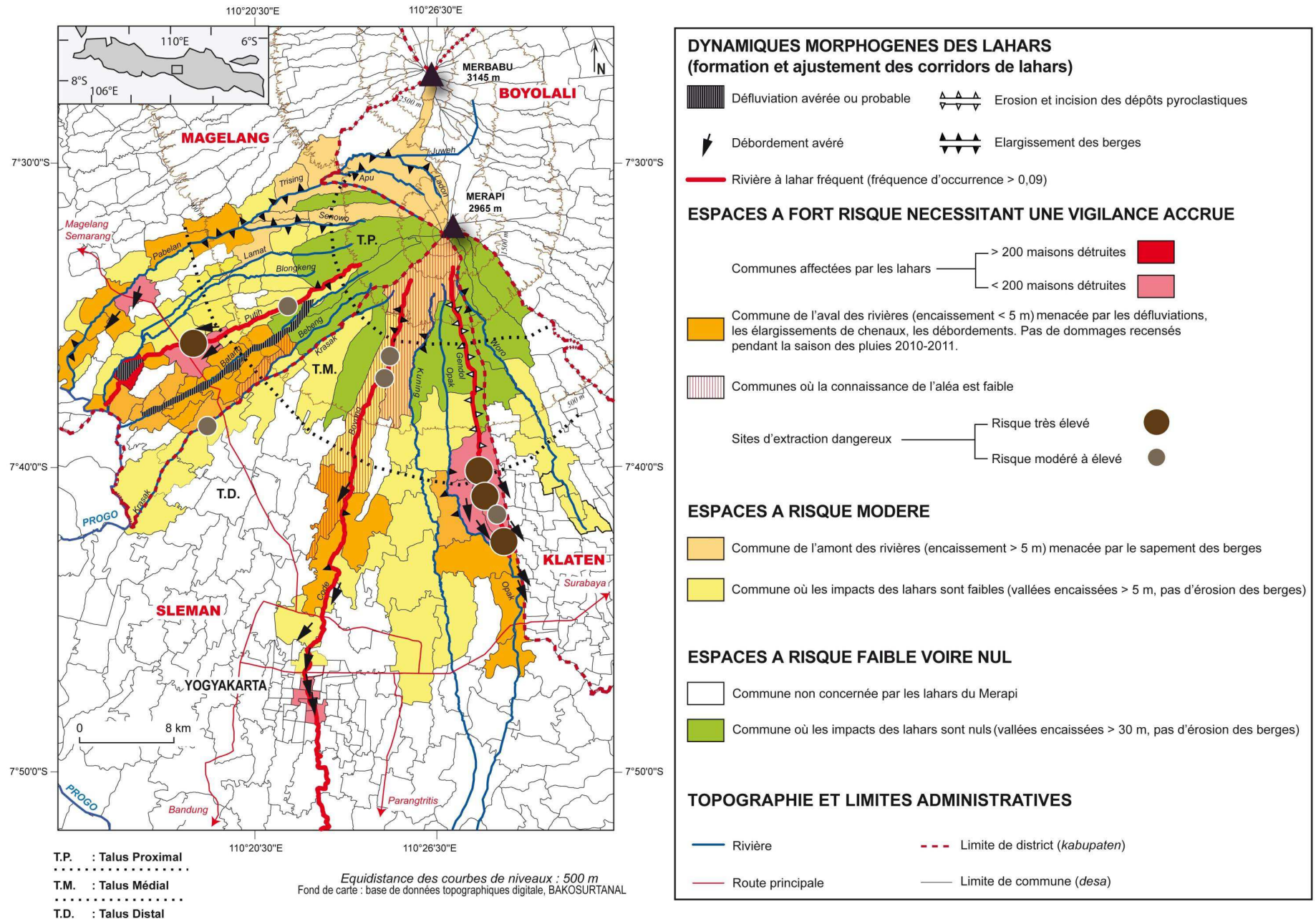


Figure 163 - Les risques liés aux lahars dans les communes du Merapi. Les cartes d'aléas du BPPTK (chap. 4, fig. 8o) peuvent être utilisées en complément pour mieux visualiser les limites de débordements à échelle locale.

Malgré tout, cette planification du travail de gestion ne doit pas rester unilatérale, et bien souvent les actions nécessitent une mise en œuvre transversale pour être plus efficaces. L'intérêt de la démarche réside pleinement dans la réalisation, l'analyse, et l'utilisation de cette série de tableaux regroupant et synthétisant pour l'ensemble des sites d'étude les facteurs du danger, leurs origines, leurs conséquences et les moyens éventuels pour tenter d'y faire face. La spécificité des sites d'extraction en tant qu'espaces singuliers sur un volcan tel que le Merapi oblige la mise en œuvre d'une gestion intégrée du risque, prenant en compte l'ensemble de l'enchaînement des processus physiques et humains à l'origine du danger.

2.3.4 Vers la réalisation d'une carte des risques liés aux lahars

En abordant la question des risques dans les sites d'extraction au terme de ce chapitre, on en revient à la thématique présentée et discutée dans la deuxième partie de ce mémoire. Cet effet de boucle montre combien forte est l'intrication des notions d'aléas et de ressource sur un volcan, plus particulièrement lorsqu'il s'agit de dépôts volcanoclastiques situés dans les corridors de lahars. En désignant les sites les plus dangereux d'après les critères de vulnérabilité, d'enjeux et d'aléas existant sur ces espaces, il est finalement possible d'aboutir à une représentation spatiale plus riche des risques au Merapi, proposée en Figure 163. La carte a été réalisée à l'échelle des communes qui représentent un maillage territorial de dimensions suffisamment grandes pour bien saisir les différentes nuances du risque à l'échelle du Merapi. Elle reprend les éléments dégagés dans la partie 2, en y incluant les principaux processus morphogènes potentiellement dommageables des lahars, mais aussi la connaissance de l'aléa. L'ajout des sites d'extraction dangereux permet de prendre en compte, outre le territoire des communes, les corridors de lahars eux-mêmes où travaillent chaque jour plus de 2000 personnes, exposés aux lahars en saison des pluies. L'ensemble des différentes zones potentiellement affectés par les lahars est donc pris en compte, et est classé en trois catégories : espaces où les lahars constituent un risque fort, espaces à risque modéré, espaces où le risque est faible voire nul. L'agencement de ces espaces met en évidence les rivières qui nécessitent une vigilance accrue.

On constate donc deux principaux espaces à risque majeur : les parties distales de la Gendol et de la Putih, où les dégâts avérés ont non seulement été très importants en 2010-2011, mais où également plusieurs centaines de travailleurs sont présents. Les opérations de réduction des risques (amélioration du système d'alerte, réunions avec les habitants et avec les responsables locaux...) devraient donc se focaliser sur ces deux rivières, et principalement dans les communes de Jumoyo et Sirahan (Putih), ainsi qu'à Argomulyo, Sindumartani et Bimomartani (Gendol). La présence d'un site d'extraction « dangereux » dans la Krasak, couplé à une mauvaise connaissance de l'aléa dans les communes riveraines, permet de classer la partie aval de cette rivière comme espace à risque. La Boyong-Code mérite également une certaine attention, notamment à cause de l'agglomération de Yogyakarta située dans sa partie aval. Enfin, le bassin-versant Pabelan est marqué par de très nombreuses dynamiques d'élargissement de berges qui menacent les rizières et certaines habitations riveraines, et doit également être considéré comme un espace risqué – et ce d'autant que des lahars de très fortes intensité et magnitude peuvent s'y produire (cf. chap. 3). En revanche, corridors de lahars et espaces riverains de rivières telles la Lamat, la Blongkeng et la Woro apparaissent moins prioritaires, principalement par les faibles enjeux qui y existent, la faible récurrence des aléas et de leurs impacts.

En signalant la présence de sites d'extraction, non seulement les différents espaces à risque sont cartographiés, mais cela permet également de ne pas oublier l'existence de cette activité qui s'inscrit très fortement dans le paysage du volcan, et qui occupe désormais la partie distal des corridors de lahars. C'est peut-être le premier pas vers une reconnaissance officielle de cette activité, vers une gestion plus rationnelle de la ressource, des bénéfices qu'elle prodigue, mais aussi des risques qu'elle produit.

3. L'aléa et la ressource : une approche systémique du risque

3.1 Une activité aidant la capacité et la résilience des communautés du Merapi ?

Si l'on considère l'ensemble des sites d'extraction dans l'organisation géographique du Merapi, on comprend combien cette activité est particulièrement structurante en dépit de son informalité. Elle est une constante dans la vie quotidienne des habitants. Le contexte économique particulièrement âpre dans des zones rurales en pleines recompositions spatiale et économique fait augmenter le chômage et diminue l'accès à la terre. Restent les sites d'extraction, devenus une aubaine pour beaucoup d'actifs de tous âges sur les flancs du volcan. Justement, sur l'ensemble du Merapi, les dépôts de lahars sont une ressource, et, à ce titre, jouent donc un rôle dans les moyens de subsistance locaux (*livelihoods*), notamment les *livelihoods* financiers (bénéfices) et physiques (matériel de construction).

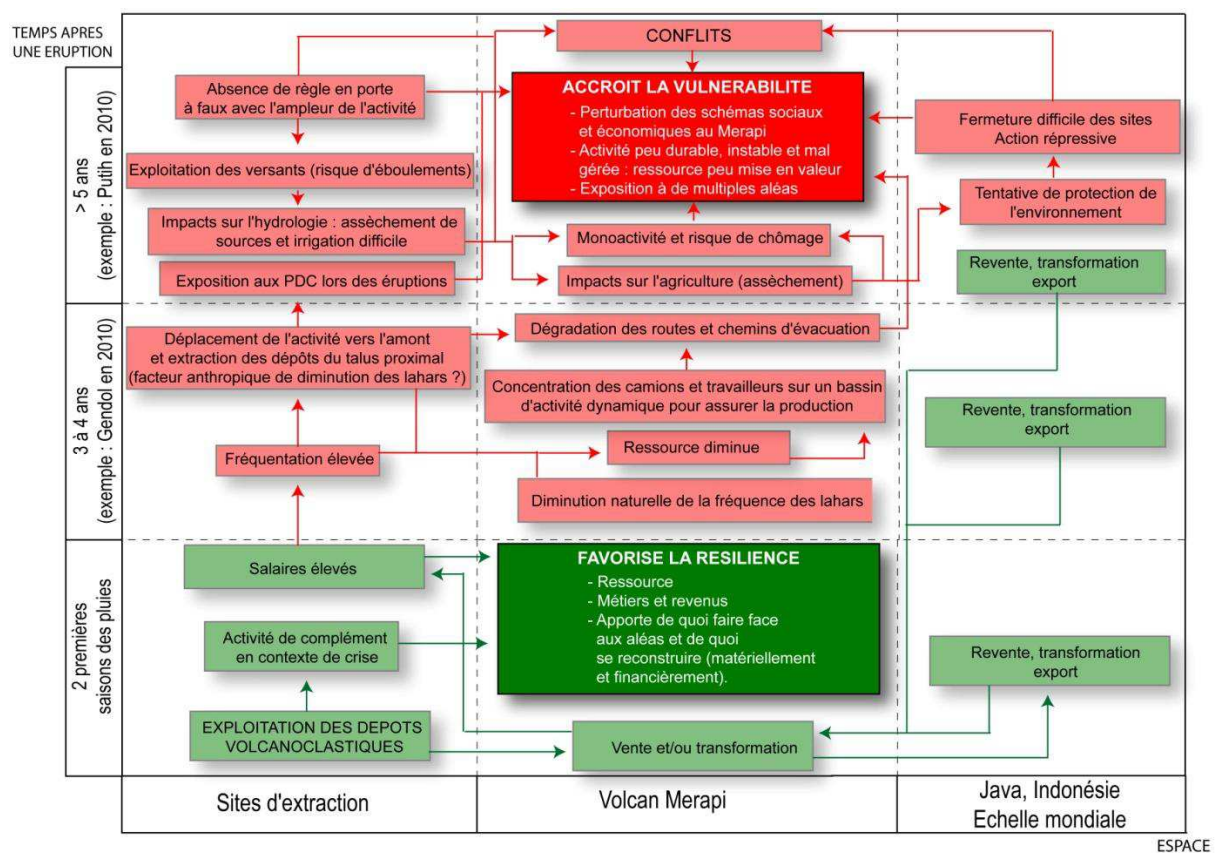


Figure 164 - Schéma d'évolution de l'activité d'extraction au Merapi dans l'espace et dans le temps. En vert : les conséquences bénéfiques. En rouge : impacts négatifs.

En cas d'éruption et de rupture des schémas socio-économiques habituels, la ressource apportée par les écoulements volcanogéniques compense les déséquilibres induits par la catastrophe en permettant le maintien d'une activité économique rémunératrice. Les extractions sont donc partie intégrante des revenus des communautés locales et permet de favoriser leur résilience. Après une éruption, les extractions contrebalancent les pertes dues aux destructions, grâce à un apport de matériel de construction et de ressources financières pour les populations locales permettant d'éviter une trop brusque chute de revenu, et donc de favoriser un rapide retour à la situation d'avant l'éruption (Figure 164). L'activité d'extraction permet donc d'aider la résilience des communautés qui subissent les perturbations induites par une éruption volcanique. Cependant, les travailleurs doivent s'exposer aux

aléas, et prennent des risques volontaires, surtout sur les sites dépourvus de systèmes de surveillance et d'alerte. L'activité permet-elle d'augmenter la capacité des populations à faire face aux aléas ? Cela suppose qu'elle puisse durablement renforcer leur situation économique. Pour mieux saisir les conséquences des extractions sur les communautés locales, la Figure 164 répertorie leurs effets à différentes échelles spatiales et temporelles, tenant compte des résultats du chapitre 6 et de ceux du questionnaire 2011.

3.2 À terme, une vulnérabilisation des communautés du Merapi ?

Le questionnaire a montré que les extractions représentent un complément de revenus pour près de 60% des répondants ; ceux-ci étant essentiellement de nouveaux travailleurs après l'éruption, on comprend bien que cette activité représente un moyen de contrebalancer les pertes induites par la situation de crise. Les hautes rémunérations sont permises par la forte demande à une échelle parfois internationale, qui permet de maintenir de bons prix de vente (cf. *supra* I.2.3). Toutefois, ce côté bénéfique de l'activité n'est pas de nature à produire un cercle vertueux durable ; les défauts de l'activité détaillés au chapitre 6, dans son organisation que dans ses impacts, tendent au contraire à poser plus de problèmes qu'à en résoudre au bout de quelques années.

Un exemple de ces conséquences en deux temps, d'abord bénéfiques, puis négatives, est illustré par le manque d'encadrement. Celui-ci amène une informalité qui autorise à première vue un accès plutôt facile à la ressource. Le chapitre 6 a montré que la surveillance est lacunaire, et le questionnaire de 2011 a révélé que la plupart des travailleurs n'en avaient pas, et n'en avaient pas demandé. De fait, à part les règles propres à chaque site, l'absence de supervision et de contrôle permet au plus grand nombre de profiter des sables et des blocs du Merapi. Cependant, une telle situation empêche une gestion sécurisée et rationnelle de l'activité, dont les bénéfices ne profitent pas au développement régional. Les gouvernements locaux n'ayant pas su s'organiser, la mafia a pu s'y immiscer, et détourner des bénéfices.

Une gestion rationnelle de l'activité serait également attentive au renouvellement de la ressource par site, pour assurer une exploitation certes limitée par des quotas, un peu moins rentable dans l'immédiat, mais certainement plus durable. Cette durabilité de l'activité est un problème décisif, quand on sait que sur certains sites (Srumbung ou Plumbon), plus de 75% des répondants n'ont pour seule activité rémunérée que les extractions. Tant que la ressource existe, leurs revenus sont assurés. Qu'en sera-t-il lorsque la fréquence des lahars diminuera, et que certains sites se retrouveront en pénurie ? Si les éruptions postérieures à celle de 2010 reprennent les caractéristiques des coulées à blocs et à cendres consécutives aux effondrements de dôme survenus tout au long du XX^e siècle, seuls quelques bassins-versants bénéficieront d'une ressource suffisante et régulièrement renouvelée. La configuration actuelle du dispositif sommital du Merapi présente une large brèche ouverte vers le sud, qui guidera très vraisemblablement la direction des prochaines éruptions. L'ouest du volcan risque alors de faire face à une pénurie qui affaiblira de manière dramatique les nombreuses personnes qui se seront trop largement reposés sur cette activité. L'activité n'est pas durable sur l'ensemble du volcan, les lahars ne se produiront pas toujours sur l'ensemble des bassins-versants comme en 2011. Une dépendance trop exclusive des communautés locales risque d'avoir des effets négatifs, comme cela a pu être observé lors de la fermeture de Jurangjero en 2009, relatée au chapitre 6. L'arrêt des extractions avait causé le chômage forcé de plusieurs dizaines de personnes pour lesquelles les extractions représentaient une solution à la pénurie d'emplois, notamment agricoles. Certes, la fermeture des sites de 2011 peut s'accompagner de l'ouverture de nouvelles carrières sur des zones qui sont encore inaccessibles après l'éruption. Les sites de l'amont de la Gendol comme Jambu-Kaliadem et Manggong, comblés de dépôts, représentent un abondant bassin qui n'a pas encore été exploité

depuis la fin de l'éruption. Si jamais des sites se tarissent, les travailleurs pourraient s'y rendre, selon le même phénomène de vases communicants expliqué au chapitre 6. En revanche, cela supposerait de nouveau l'exposition des travailleurs non plus seulement aux lahars, mais aux aléas éruptifs comme les coulées pyroclastiques. Les éboulements, inexistant dans la partie médiale et surtout distale des corridors de lahars, sont également plus fréquents. La réouverture des sites d'amont peut effectivement pallier l'absence de pérennité de la ressource dans les parties distales des bassins-versants du Merapi, mais elle suppose une exposition à plus d'aléas. Par ailleurs, le creusement intensif des parties médiales des corridors de lahars peut exacerber la diminution de la ressource en aval en retirant artificiellement le matériel volcanoclastique en amont. Cet effet rétroactif risque de causer quelques difficultés aux communes comme Bimomartani ou Sindumartani, en aval de la Gendol, qui ont mis en place des systèmes de péages leur fournissant plusieurs dizaines de millions de rupiahs (milliers d'euros) par mois (cf. supra II.2.5).

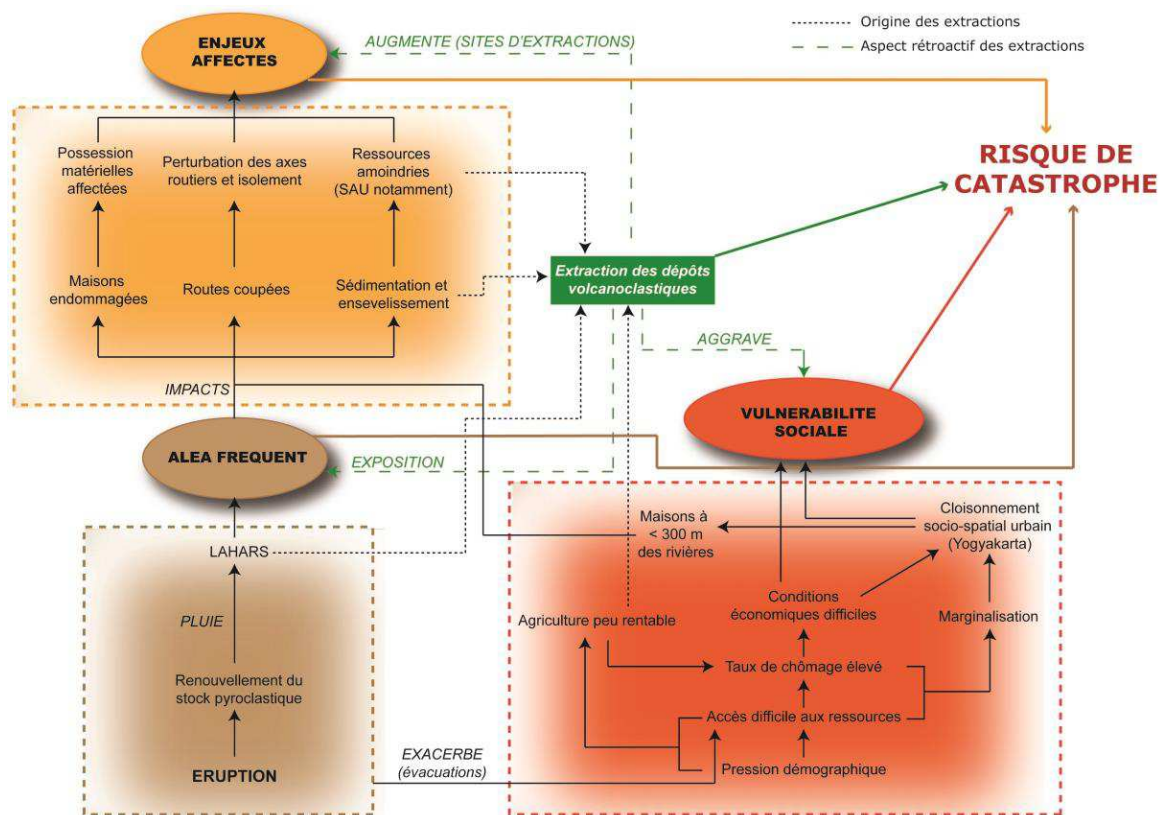


Figure 165 - Approche systémique du risque dans les corridors de lahars du Merapi après l'éruption de 2010

Enfin, l'exploitation anarchique des dépôts a des impacts négatifs sur les infrastructures, sur l'environnement (chap. 6) mais débouche aussi sur des problèmes sociaux graves. La dégradation des routes pose la question de la qualité fonctionnelle des réseaux d'évacuation en cas de crise volcanique future (voir la thèse d'E. Mei, en cours). La surexploitation peut conduire à l'exploitation des versants et provoquer des éboulements, représentant un aléa supplémentaire pour les travailleurs. D'un point de vue économique, les perturbations de la circulation des eaux souterraines peuvent affaiblir l'agriculture de certains villages, et bouleverser localement le système de production. Cet impact, expliqué au chap. 6, est le chef d'accusation qui revient le plus souvent de la part des détracteurs des extractions. La contestation et les débats qu'elles provoquent (cf. chap. 6) sont certainement l'un de leurs plus graves effets pervers : il s'agit d'une activité source de conflits avec les agriculteurs, de conflits entre communes, et de conflits avec les instances administratives si jamais elles tentent de réguler l'activité. Ces tentatives sont au demeurant assez inefficaces, et ne peuvent fonctionner

qu'avec l'appui d'une politique répressive qui peut fonctionner sur un espace réduit (Jurangiero en 2009-2010), mais qui sera difficile à généraliser à plus petite échelle. Dans tous les cas, les extractions attisent des conflits latents entre communautés villageoises, nourrissent des rancœurs territoriales entre communes et exacerbent les tensions entre les autorités et les habitants du Merapi. Si l'on y rajoute la corruption, la mafia, et surtout le manque de pérennité de la ressource et des revenus, on comprend bien qu'une telle activité n'est pas une solution durable pour les communautés du Merapi. Même si les extractions peuvent favoriser la résilience des communautés, elles n'en augmentent pas la capacité, et contribuent même à les affaiblir davantage sur le long terme. Elles sont le miroir de la vulnérabilité au Merapi – voire à Java, d'abord causée par des difficultés économiques qui contraignent des milliers de personnes à creuser les dépôts par manque d'autres moyens de subsistance. Elles sont également le catalyseur du risque, puisqu'elles amènent des populations vulnérables sur des espaces où l'aléa est fréquent. Il ne s'agit donc pas d'une activité pouvant augmenter les capacités des communautés du Merapi, comme on pouvait en faire l'hypothèse. Bien au contraire, elles révèlent et exacerbent une série de problèmes économiques et sociaux, et ne représentent pas une source de revenus stable et pérenne. L'apparent rôle bénéfique des extractions en contexte postéruptif, favorisant la résilience, mérite donc d'être nuancé.

Les sites d'extraction représentent ainsi une clé de lecture intéressante des risques. L'organigramme représenté en Figure 165 modélise les différentes interactions reliant les facteurs du risque, aux centres desquels existent les extractions, nourries par des aléas (lahars) fréquents, par la nécessité de pallier la disparition de certaines surfaces agricoles, et par la recherche d'une activité lucrative dans un contexte social et économique difficile. Les effets rétroactifs des sites d'extraction sont également signalés : l'aléa n'est plus répulsif mais attractif – ce qui pose des problèmes de sécurité : les corridors de lahars attirent ainsi chaque jour plusieurs milliers de travailleurs, démultipliant ainsi les enjeux. Enfin, l'activité, à terme, peut aggraver la vulnérabilité des habitants. Ainsi, la compréhension du risque de catastrophe¹⁰ existant autour du volcan Merapi est-elle éclairée par l'étude de l'activité d'extraction, qui met en avant les différents éléments à l'origine du danger. L'activité est risquée en elle-même, mais elle est également au cœur de la question des risques au Merapi et des processus qui les créent.

L'objectif de cette rubrique était de classer les sites en fonction d'une mesure du danger, établie à partir d'une valeur de fréquence d'occurrence d'aléa, de vulnérabilité, d'enjeux. L'ensemble des facteurs du risque ont été intégrés dans une méthode d'analyse progressive et quantitative, issue de données qualitatives accumulées depuis le début de la thèse (observations, entretiens) et de données quantitatives apportées par le questionnaire. La prise en compte du risque dans ces sites d'extraction aboutit à une compréhension de l'ensemble des espaces pouvant être affectés par les lahars du Merapi. La carte de synthèse (Figure 163) détermine plusieurs espaces potentiellement dangereux à l'échelle des communes, permettant de distinguer différentes zones de risque décroissant. C'est autour des rivières Putih et Gendol que les espaces à risque sont les plus nombreux, mais la Krasak et la Boyong-Code nécessitent également d'être surveillées et prises en compte dans les schémas de réduction des risques. Enfin, l'analyse prospective de l'activité d'extraction, extrapolant les résultats du questionnaire, montre que l'activité peut aider à la résilience des communautés du Merapi ; mais elle n'en augmente pas la capacité. Au contraire, la faiblesse de son encadrement, et sa grande dépendance des rythmes éruptifs du Merapi n'en font pas une activité durable. Elle n'est donc pas à même de fournir une solution aux problèmes d'emploi existant au Merapi, et peut être considérée comme un facteur de vulnérabilité à long terme.

¹⁰ Le terme de « risque de catastrophe » est ici privilégié, car il ne s'agit pas seulement de discuter des risques liés aux seuls lahars, mais d'élargir la réflexion aux autres aléas susceptibles de se produire au Merapi : une catastrophe de grande ampleur est probable, compte tenu de l'existence de processus vulnérabilisants.

L'objectif de ce septième et dernier chapitre était de mettre en avant les effets d'une éruption volcanique majeure telle que celle de 2010 sur les sites d'extraction du Merapi. En réponse quasi-instantanée aux importants changements induits par l'intensité des phases éruptives, l'ensemble de l'activité s'est réorganisée. La première partie du chapitre a présenté les grandes lignes de la nouvelle distribution spatiale des sites d'extraction, selon deux modes de répartition. Le premier répertorie les sites en fonction de leur ancienneté (sites anciens, sites nouvellement installés...), tandis que le second propose une classification fondée sur les volumes extraits quotidiennement, dans la continuité de ce qui avait été proposé au chapitre 6. La seconde partie du chapitre s'est intéressée de plus près à l'évolution de l'activité et des travailleurs après l'éruption, d'après les résultats d'une campagne d'enquêtes par questionnaire réalisée en juin 2011. Les résultats ont montré qu'une importante proportion de répondants sont de nouveaux mineurs : les extractions sont donc une activité essentielle au Merapi, permettant d'assurer un revenu en période difficile (récupération post-crise). L'exploitation demeure toujours autant informelle, sans encadrement solide ni régulation stricte, témoignant là encore de l'incapacité problématique des administrations à gérer l'activité. En contexte postéruptif, les extractions sont donc une solution pour résorber le manque à gagner subi par les dégâts de l'éruption et le temps passé dans les centres d'évacuation. Pourtant, c'est également en contexte postéruptif que les lahars pluviaux sont le plus à même de se produire. Plus de 2500 personnes viennent tous les jours dans les corridors de lahars pour en extraire les matériaux : à l'heure où les lahars sont de plus en plus fréquents en contexte postéruptif, il est nécessaire de s'intéresser de plus près aux risques existant dans les sites d'extraction qui sont directement exposés aux aléas.

S'il y a risque, c'est parce qu'il y a ressource. Pour bien comprendre le risque dans ces unités spatiales originales, des indices de vulnérabilité et d'enjeux ont été calculés, et associés à la fréquence de l'aléa pour produire une valeur de risque quantifiée. L'intérêt est double : d'une part mieux protéger les travailleurs en définissant les facteurs de risque ; d'autre part, aboutir à une représentation plus complète des espaces menacés par les lahars autour du Merapi en n'oubliant pas les sites d'extraction qualifiés de dangereux. Ceux-ci participent à la mise en évidence des zones d'action prioritaire pour la réduction des risques au Merapi, et méritent donc d'être plus systématiquement étudiés, régulés et protégés. En effet, si l'activité d'extraction est d'abord un moyen de survie après une éruption intense, c'est une activité qui finalement perdure, principalement à cause de difficultés sociales et économiques dans la région du Merapi. Cependant, il ne s'agit pas d'une solution durable : l'activité n'est pas pérenne en un lieu donné, puisqu'elle dépend des éruptions et des lahars du volcan, et elle est mal gérée. C'est même une activité qui affaiblit, à terme, les communautés, compte tenu des nombreux impacts négatifs qu'elle produit et qui ne sont pas perceptibles immédiatement. Les extractions doivent donc être prises en compte dans l'étude des risques au Merapi : non seulement les sites où elles se pratiquent, mais aussi l'activité avec ses ramifications sociales et économiques à l'échelle du volcan. Au final, dans les corridors de lahars, les risques peuvent être expliqués de manière systémique, où le rôle de l'activité d'extraction nécessite d'être clarifié puisqu'il est un élément à part entière de la combinaison constitutive du risque : c'est une activité dont l'expression spatiale (les sites) combinent aléas, vulnérabilité et enjeux.

SYNTHÈSE ET DISCUSSION DE LA TROISIÈME PARTIE

LES SITES ET L'ACTIVITÉ D'EXTRACTION : DES CLÉS DE LECTURE PERTINENTES POUR L'ANALYSE DES RISQUES SUR UN VOLCAN ACTIF ?

1. Quantifier le risque : intérêt et limites

1.1 De quel risque s'agit-il ?

À la fin du chapitre 6 ont été présentés les dommages que causent les lahars dans les sites d'extraction : les « incidents » qui emportent le matériel, et les « accidents » qui mettent en jeu la vie humaine. Cette définition peut être prolongée par celle proposée par Leone *et al.* (2010), qui définissent les caractéristiques théoriques de l'accident :

Tableau 45 - Les sites d'extraction : des risques d'accident (d'après Leone *et al.*, 2010)

Accident : la situation est contrôlable moyennant une réaction rapide et organisée	Application aux sites d'extraction du Merapi
Événement circonscrit dans l'espace et le temps (quelques heures à quelques jours)	Le lahar dure généralement de 1 à 2 heures ; le dégagement des corps, des camions ou pelleteuses emportés dure quelques jours.
Un scénario connu	Très bonne connaissance de l'aléa.
Des procédures d'urgence codifiées	Système d'alerte existant
Petit nombre d'intervenant qui se connaissent et savent travailler ensemble	Vrai pour les sites d'extraction plus faiblement fréquentés et à rayonnement local (Srumbung, sites de la Boyong, sites à fréquentation sporadique), mais à nuancer pour ceux où la fréquentation dépasse 100 travailleurs par jour.
Responsabilité et hiérarchie des intervenants acceptés	À nuancer étant donné l'absence de gestion centralisée des sites et de l'activité.
Peu de difficulté de communication interne	À nuancer étant donné l'absence de gestion centralisée des sites et de l'activité.
Couverture aisée par les assurances	Pas pour la plupart des travailleurs qui ne bénéficient pas d'assurance pour les véhicules qu'ils ont loués.
Importance économique circonscrite	Circonscrite spatialement et temporairement, puisque l'activité d'extraction reprend très rapidement (quelques heures) après le passage des pulsations les plus énergiques des lahars, dès que l'essentiel des corridors de lahars n'est plus envahi par l'écoulement.

Sur un site d'extraction, les dommages causés par un lahar, en dehors des potentielles victimes, ne créent pas de situation de crise durable comme dans les communes du talus distal (cf. partie 2). La temporalité de l'accident joue en effet sur des rythmes beaucoup plus resserrés que dans le cas d'une crise ou d'une catastrophe (Tableau 45). Malgré tout, la présence permanente de ces sites rend la menace perpétuelle en saison des pluies, et nécessite de bien distinguer quels sont les endroits où l'activité est la plus dangereuse, ainsi que cela a été présenté au chap. 7.

1.2 Une tentative d'approche quantifiée

L'évaluation des risques existant sur un espace donné repose sur la caractérisation de ses trois facteurs principaux : la probabilité (ou la fréquence d'occurrence statistique sur une série temporelle définie) d'aléa(s), la valeur des enjeux exposés, la vulnérabilité des biens et des personnes. La mesure quantifiée du risque à l'aide d'indices composites est un élément nécessaire pour représenter la variabilité spatiale du risque (Leone *et al.*, 2010), et la démarche proposée au chapitre 7 existe dans d'autres contextes géographiques, pour d'autres aléas et à d'autres échelles. L'un des axes de recherche du projet CARIBSAT (*Caribbean Satellite Environmental Information System*, coordonné par l'IRD) met en œuvre des indices de risque composites à l'échelle des Caraïbes pour proposer une évaluation quantifiée du risque, et mettre en avant les espaces les plus dangereux face aux aléas sismique et volcanique. Une approche multi-aléas permet en outre de distinguer les espaces sur lesquels existe le risque global (IRG Indice de Risque Global) le plus élevé. La méthode de calcul rejoint celle proposée au chap. 7 du présent mémoire, en évaluant les valeurs de l'aléa (fréquence d'occurrence pour l'indice global, intensité pour l'aléa sismique), des enjeux (urbanisation) et de la vulnérabilité (inverse de l'IDH). Cette mesure du risque aboutit à un traitement cartographique permettant de visualiser quels sont les espaces sur lesquels le risque est le plus fort (Leone et Deymier, inédit). Toutefois, l'échelle d'analyse étant bien plus petite que celle du Merapi, les critères choisis pour quantifier la vulnérabilité et les enjeux sont plus généraux, correspondant à des valeurs de développement calculés pour un territoire dans son ensemble (Indice de Développement Humain). Dans le cas des sites d'extraction du Merapi, il a fallu ajuster l'étude des éléments vulnérabilisants à la situation locale, parfois à micro-échelle, en se fondant non plus sur des indices globaux, mais sur des scores déterminés d'après des seuils issus d'une enquête par questionnaire, et qui méritent discussion. Cette méthode a d'ailleurs été tentée par A.C. Chardon à Manizales (Colombie) : après avoir distingué plusieurs critères de vulnérabilité à l'échelle des quartiers (*barrios*) et à celle de la ville, des coefficients leur ont été attribués pour rendre compte de leur poids et favoriser leur comparaison (1994), donnant lieu ensuite à une cartographie (Chardon et Thouret, 1994).

1.3 La difficile quantification objective et complète de tous les facteurs du risque

1.3.1 Les aléas : fréquence et intensité

Les sites d'extraction se forment, au Merapi, directement dans les zones affectées par les lahars. Cette localisation particulière nécessite d'accorder une attention toute particulière à l'aléa lui-même, non seulement en termes de processus, mais aussi en termes de fréquence d'occurrence. Dans l'étude des lahars post-éruptifs, phénomènes récurrents et répétitifs, la fréquence statistique est un élément d'analyse pertinent permettant de distinguer les bassins-versants particulièrement sensibles au déclenchement des lahars de ceux qui le sont moins. L'accent doit absolument être mis sur cette étude comparée de l'occurrence des lahars dans la mesure où c'est cette dernière qui justifie, pour une bonne part, la localisation des sites d'extraction.

Malheureusement, la fréquence ne prend en compte ni l'extension ni l'intensité des événements ; or il est évident que tous les écoulements n'ont pas systématiquement atteint l'ensemble des sites d'extraction situés les plus en aval. Pour Sukorini (Woro) ou Opak-Gendol (Gendol), la fréquence de l'aléa est ainsi surestimée car la plupart des lahars ne les atteignent pas. Ces sites et notamment ceux de la Putih sont cependant exposés à des lahars plus exceptionnels d'intensité maximale $Q_p > 1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ qui n'ont pas été trouvés ailleurs (à part dans la Pabelan) ; il n'est donc pas foncièrement incohérent de les considérer comme « dangereux » : en dépit d'une fréquence plus faible, l'aléa qui les atteint peut être très intense (cf. chap. 3).

Par ailleurs, la fréquence d'occurrence des lahars proposée ici est calculée d'après les événements survenus depuis le 26 octobre 2010 jusqu'au 1^{er} mai 2011, et n'ont qu'une valeur indicative qui ne saurait être traitée de manière absolue. Les études futures devront prendre en compte la variabilité spatiale de ces lahars, qui risquent très probablement de devenir de plus en plus fréquents dans la Gendol, où le stock de matériaux pyroclastiques remobilisables en amont est particulièrement volumineux. L'évaluation des risques proposée ici pour les sites d'extraction autour du Merapi doit donc être régulièrement actualisée. Dans l'idéal, la réactualisation pourrait être réalisée au début de chaque nouvelle saison des pluies de manière à avoir une action préventive

Enfin, les autres aléas volcaniques pouvant affecter les sites d'extraction situés sur le talus médial voire proximal (Balerante notamment), tels les déferlantes et coulées pyroclastiques, ont été volontairement écartés de l'évaluation des risques, dans la mesure où la grande majorité des sites d'extraction en 2011 sont situés hors de leur périmètre d'extension habituel. Les déferlantes et coulées pyroclastiques de novembre 2010, qui ont pu atteindre dans la Gendol une distance deux fois supérieure, correspondent à des phases éruptives explosives plus rares (Thouret *et al.*, 2000), et sont de fait peu probables dans un futur proche.

1.3.2 Quantifier la vulnérabilité

- La question des scores de vulnérabilité

La vulnérabilité est un élément fondamental du risque, mais aucune échelle universelle n'existe pour la mesurer. Dans le cadre de cette thèse, il a été décidé de quantifier la vulnérabilité en attribuant une valeur à chaque élément vulnérabilisant dans les sites d'extraction. La démarche proposée ici pour la délimitation des seuils et l'attribution des scores de vulnérabilité demeure empirique, mais elle a l'avantage de permettre une évaluation et un classement des sites d'étude en fonction de la valeur des éléments vulnérabilisants distingués. L'apport d'un soutien quantitatif issu du traitement des questionnaires permet de pallier les approximations inévitables liées à toute analyse subjective, laquelle est inhérente aux études de géographie des risques consacrées à la vulnérabilité, qui se caractérisent d'abord par le « [choix] d'indicateurs pertinents » (D'Ercole *et al.*, 1994, p. 91). Le score obtenu correspond donc à une somme d'éléments vulnérabilisants pondérés les uns par rapport aux autres, le principal étant la question du choix que font les personnes lorsqu'un aléa est probable ou signalé : rester ou partir.

La valeur de vulnérabilité est adaptée aux sites d'extraction du Merapi, et ne prendrait pas sens ailleurs. Il ne s'agit donc pas d'une évaluation universelle (comme peut l'être l'IDH à une échelle plus petite), mais d'un mode de classement relatif à un espace considéré. Chardon (1994) avait d'ailleurs également fait ce constat, en précisant que la hiérarchie des facteurs proposée n'était valable que pour la ville de Manizales ; on pourrait ajouter qu'elle ne permet de caractériser la vulnérabilité de cet espace qu'au moment où l'étude a été réalisée, à savoir au début des années 1990. La vulnérabilité est bien propre à un espace, mais aussi à un moment précis.

- **Pourquoi la prise de risque est-elle si déterminante dans les sites d'extraction ?**

La prise de risque a été définie ici comme l'élément de vulnérabilité principal, étant donné que la connaissance de l'aléa est très bonne, avec des taux de bonnes réponses à 100%. Cette situation est assez exceptionnelle, dans la mesure où la plupart des études de risque montrent au contraire que les aléas sont parfois mal connus, et provoquent une perception mauvaise du risque – le chapitre 4 lui-même montre d'ailleurs que la connaissance des lahars n'est pas bonne partout autour du volcan. La méconnaissance des processus et des dynamiques d'un aléa a été assez largement étudiée (Dauphiné, 2001), et ce dans plusieurs contextes géographiques : les crues du Colorado aux États-Unis (Drabek, 1999), la montagne Pelée (D'Ercole et Rançon, 1994), les volcans javanais dont l'occurrence des éruptions est faible (Lavigne *et al.*, 2008), le volcan Santorin (Dominey-Howes et Minos-Minopoulos, 2004), ou même le Vésuve (Barberi *et al.*, 2008 ; Carlino *et al.*, 2008 ; Rolandi, 2010). À ces manques de connaissances du danger s'ajoutent le refus du danger, traduits par l'ignorance délibérée d'un message d'alerte, et de l'ordre d'évacuer (De La Cruz-Reyna, 1999 ; Quarantelli, 2001 ; Gaillard *et al.*, 2001 ; Gaillard, 2008 ; Texier *et al.*, 2009 ; De Bélizal *et al.*, 2012). Dans ce dernier cas, il peut s'agir de populations refusant sciemment de partir pour ne pas abandonner derrière eux les biens matériels qu'ils possèdent et les ressources auxquelles ils ont accès. Cet aspect est largement défendu par les partisans de l'approche radicale des risques (Hewitt, 1983 ; Wisner et Luce, 1993 ; Gaillard, 2008).

Dans les sites d'extraction, il s'agit de mineurs qui souhaitent terminer le remplissage de leur camion, quitte à attendre le dernier moment pour partir. Il s'agit d'une dimension plus psychologique, montrant que la perception est contrebalancée par l'acceptabilité du danger (Leone et Vinet, 2006) : lorsque le risque est pris volontairement, il a tendance à être plus facilement toléré que s'il survenait de manière incontrôlée et subie (Slovic, 2000). La situation est renforcée par le faible nombre d'accidents survenus dans les sites d'extraction, qui peut laisser penser aux travailleurs qu'il y a toujours possibilité d'évacuer à temps – mais qui ignore les conséquences désastreuses qu'une telle conduite pourrait produire si la fréquentation des sites augmente dans les années à venir (notamment par effet de concentration des effectifs sur un ou deux bassins d'extraction principaux si la ressource vient à manquer ailleurs). Cette apparente maîtrise de la situation amène ce que Kouabenan (2006) appelle « l'illusion d'invulnérabilité » (p. 136) : il ne s'agit pas d'une méconnaissance du risque, mais au contraire d'un biais cognitif qui suppose que l'absence d'accidents est définitive, que les dommages arrivent ailleurs, ne concernent que les autres (Slovic *et al.*, 1981). Plusieurs entretiens avec des responsables locaux et des discussions informelles avec des mineurs traduisent cette idée, notamment à Plumbon dans la Gendol ou à Kemiri dans la Boyong où certains travailleurs ont dit qu'ils se sentaient « en sécurité », tandis que les autres sites sont dangereux : « ici [Plumbon], les travailleurs n'ont pas grand-chose à craindre, les alertes arrivent à temps, et l'espace est suffisant pour permettre à tout le monde de manœuvrer et de quitter le site en moins de 30 min. Pas comme dans la Krasak ou dans la Putih, là-bas, la gestion est anarchique et il y a même eu des morts » (Mas Ari, entretien, février 2011). « Nous n'avons pas de problème de sécurité ici, nous sommes peu nombreux et les lahars sont rares et ils ne sont pas très gros ; les vrais dangers concernent plutôt la Gendol ou la Putih, où des milliers de personnes se concentrent, et surtout des gens qui ne sont même pas originaires du Merapi ! » (Mbak Yarni, entretien, février 2011). « Oui, il y a eu des morts ici [Pondokrejo], mais ils n'ont pas été prudents ! J'ai reçu une alerte sur mon talkie-walkie près d'une demi-heure avant que le lahar n'arrive. Tout le monde est parti sauf eux, mais je ne peux pas pousser le camion hors des carrières à leur place. Mais malgré cela, ce site d'extraction est plutôt sûr ; c'est dans la Putih qu'il y a eu des morts¹¹ » (Pak Joko, entretien, février 2011).

En outre, l'acceptabilité est déterminée par un effet de balance entre les avantages et les inconvénients de la conduite adoptée (Cadet, 2006) qui n'est pas difficile de caractériser dans les sites

¹¹ Pas dans les sites d'extraction, mais une victime à Sirahan lors de l'événement du 9 janvier 2011.

d'extraction : quand bien même il pleut au sommet du Merapi, le lahar n'est que probable, abandonner le chargement du camion représenterait trop de perte ; quand bien même l'alerte est donnée, il y a encore suffisamment de temps (15 à 30 min, cf. chap. 4) pour encore terminer le chargement.

- **Comment améliorer les scores de vulnérabilité ?**

Rétrospectivement, on peut regretter que le questionnaire n'ait pas pris en compte le sentiment de sécurité que peuvent ressentir les travailleurs sur les sites d'extraction, bien que la question de la prise de risque renseigne néanmoins assez bien sur leur pratique. Des enquêtes de perception plus détaillées pourraient être menées à l'avenir, surtout si l'activité se resserre autour de quelques sites ayant des fréquentations quotidiennes très élevées.

Le score de vulnérabilité peut être aussi amélioré par l'ajout d'autres éléments vulnérabilisants ; auquel cas, le total théorique à $V = 100$ proposé ici pourrait être modifié. Des études plus approfondies pourraient notamment s'intéresser au temps nécessaire pour évacuer un site à partir du moment où l'alerte a été donnée, en définissant précisément les comportements des travailleurs, des vendeurs dans les *warung* et des chauffeurs. Étant donné qu'il n'existe souvent qu'une ou deux voies d'accès et de sortie, les embouteillages sont fréquents dans les sites les plus fréquentés. Des modélisations multi-agents pourraient enrichir l'analyse de vulnérabilité en apportant une nouvelle information qui n'a pas pu être traitée dans cette thèse : l'évacuation est-elle aisée ou non ? Les seuils seraient délimités en fonction de plusieurs temps de parcours enregistrés dans les sites d'extraction, et apporteraient un indice supplémentaire : les sites où les temps d'évacuation sont longs (par rapport au moment où a été émise l'alerte) auraient un score de vulnérabilité augmenté.

1.3.3 Quantifier les enjeux

La quantification des enjeux s'est résumée à une estimation des biens et des personnes exposées aux lahars dans les sites d'extraction, en fonction de la fréquentation quotidienne. La quantification du prix des pertes possibles est difficile à réaliser compte tenu de la grande hétérogénéité des outils de travail, et de l'organisation du travail par groupes à géométrie variable qui rend complexe le calcul des pertes personnelles qu'occasionnent l'endommagement ou la disparition du matériel. Les camions, par exemple, sont tous des modèles à capacité de 4 m³, mais de marques différentes (Suzuki, Mitsubishi essentiellement) et surtout d'âge indéfini ; ils appartiennent souvent aux chauffeurs, mais pas à l'ensemble du groupe de travailleurs. La valeur économique exacte des biens demeure ainsi quasi-irréalisable, et surtout n'apporterait pas d'information plus précise, puisqu'il n'existe pas de sites où les véhicules seraient plus neufs – et donc plus chers – que les autres. La valeur des enjeux se fonde donc sur des seuils de fréquentation établis d'après les effectifs journaliers. Tout comme pour la vulnérabilité, il s'agit d'un score relatif qui permet de comparer entre eux les sites d'extraction du Merapi, mais ne correspond pas à une échelle d'évaluation universelle des enjeux exposés à un aléa.

1.3.4 Portée des résultats obtenus

Au final, les résultats prennent la forme d'un produit donnant une valeur de risque relative pour mettre en évidence la variabilité spatiale du risque entre sites d'extraction autour du Merapi. Cette étude à échelle fine ne prévaut que pour le cas d'étude de cette thèse : les chiffres en eux-mêmes ne possèdent pas de signification, et ne servent qu'à opérer des typologies, et à en classer les critères. Le classement permet également de nuancer certaines idées préconçues qui ont pu apparaître au début de ce travail, concernant notamment la Kuning. La rivière n'ayant pas connu de lahars ni de sites d'extraction depuis bien longtemps, les populations riveraines semblaient donc moins préparées à

l'aléa qu'ailleurs. Toutefois, en prenant le temps de considérer ce que signifie la vulnérabilité dans les sites d'extraction, de réfléchir aux enjeux existant, cet *a priori* disparaît assez vite, et, finalement, l'exploitation des dépôts de lahars de la Kuning apparaît bien moins dangereuse que dans la Gendol ou dans la Putih.

Chercher à développer des méthodes de calcul d'indices composites de risque, même selon des valeurs relatives, a l'avantage d'amorcer une réflexion sur ce que signifie le risque à l'échelle considérée. L'évaluation proposée ici est d'ailleurs souple, et peut se prêter à de multiples ajustements et adaptations. Les résultats issus de cette méthode d'attribution de scores sont donc perfectibles, mais ils permettent déjà une comparaison et une discrimination assez nette des différents types de sites d'extraction autour du Merapi pour compléter la compréhension du risque autour de ce volcan. Comme M. Reghezza le soutenait dans sa thèse, « certaines formes de vulnérabilité sont spécifiques à des espaces géographiques donnés » (2006b, p. 10) : la troisième partie de ce travail a justement montré que l'étude des risques liés aux lahars du Merapi ne s'arrête pas aux seuls espaces menacés dans le territoire des villages. Au contraire, elle doit être complétée par une analyse des différents facteurs du risque dans les sites d'extraction installés dans les corridors de lahars.

2. Ressource et risques dans les corridors de lahars

Le cas du Merapi peut être adapté à d'autres volcans dont les produits éruptifs et volcanoclastiques sont extraits, afin de comprendre non seulement les risques auxquels s'exposent les travailleurs lorsqu'ils exploitent une ressource apportée par des aléas, mais aussi d'évaluer la place éventuelle d'une telle activité dans les schémas sociaux et économiques locaux et des faiblesses qu'elle peut révéler, pour une meilleure appréhension des processus à l'origine du risque.

2.1 Discussion des estimations des volumes extraits au Merapi

Les chapitres 6 et 7 ont tenté d'évaluer les volumes extraits dans les carrières du Merapi. Les chiffres obtenus sont à considérer comme des ordres de grandeur, puisqu'il n'existe pas de documents recensant officiellement les rythmes d'extraction ; même les péages ne notent pas les passages de camions et la teneur de leur chargement. D'après un corpus documentaire varié permettant de comptabiliser le nombre de camions présents chaque jour dans les sites, les volumes exploités ont pu être déduits. Les comptages réalisés sur le terrain en 2010 donnent une idée plus fiable de la fréquentation des sites et des volumes exploités, mais sur quelques mois seulement. Au final, les rythmes de l'activité ont pu être reconstitués, et peuvent d'être comparés à ceux des autres pays.

La production mondiale en matériaux volcaniques (sables, ponces, blocs et pouzzolanes) est enregistrée, quantifiée, et les prix sont élaborés de manière globale, recensés notamment par l'USGS (Tableau 46). Il est frappant que ce tableau résumant la production mondiale de matériaux volcaniques de construction (sables et ponces), regroupant des pays très volcanisés comme les Philippines, le Chili, l'Italie, l'Islande ou le Costa Rica, mais également des pays où les volcans sont moins nombreux comme la Croatie ou l'Algérie, ne mentionne pas l'Indonésie. En 2010, $2,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ de matériaux volcanoclastiques ont été extraits d'après les estimations du chap. 6, ce qui revient à $3,9 \times 10^6 \text{ t}$ (en considérant que les volumes extraits contiennent : un tiers de blocs d'andésite dont la masse volumique est $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, et deux tiers de sables de masse volumique $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$). Cette valeur avoisine les valeurs de production annuelles maximales relevées dans le tableau de l'USGS (Turquie à $4 \times 10^6 \text{ t}$). Le chiffre est peut-être surévalué, car il ne tient pas compte de l'éventuelle

Tableau 46 - Les extractions de matériaux volcaniques (ponces, pouzzolanes notamment) dans le monde (USGS, 2012 – traduit). *Valeurs exprimées en tonnes.*

Pays	2006	2007	2008	2009	2010
Algérie, pouzzolane	433 190	570 000	490 567	328 000	450 000
Argentine, ponces	17 665	16 200	6 500	7 020	7 000
Burkina Faso	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
Cameroun, pouzzolanes	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000
Chili, ponces et pouzzolanes	1 423 144	1 135 771	1 063 176	919 249	915 000
Costa Rica	8 000	--	--	--	--
Croatie, tuff volcanique	17 157	15 085	15 000	15 000	15 000
Dominique, ponces et cendres volcaniques	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
Équateur:					
Pouzzolanes	700 007	582 560	580 000	580 000	580 000
Ponces	8 730	153 500	100 000	100 000	100 000
Salvador, pouzzolanes	223 000	223 000	223 000	200 000	NA
Erythrée, ponces	1 072	55	60	60	60
Ethiopie	255 622	22 000	35 000	58 000	60 000
France, pouzzolanes	272 000	250 000	276 000	276 000	276 000
Grèce					
Pouzzolanes de Santorin	1 400 000	1 400 000	1 059 000	830 000	900 000
Ponces	850 000	850 000	828 000	381 000	380 000
Guadeloupe, ponces	210 000	210 000	210 000	200 000	200 000
Guatemala, ponces	--	220 389	393 779	394 955	400 000
Honduras, pouzzolan ^{es}	100 000	100 000	100 000	100 000	--
Islande:					
Ponces	105 000	100 000	100 000	100 000	100 000
Scories	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
Iran	1 400 000	1 500 000	1 500 000	1 500 000	1 500 000
Italie:					
Pouzzolane	4 000 000	4 000 000	3 000 000	3 000 000	3 000 000
Ponces	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000
Jamaïque, pouzzolanes	149 279	114 482	124 304	132 470	125 000
Kosovo, tuff volcanique	--	--	45 005	58 788	60 000
Macédoine, tuff volcanique	60 000	80 910	103 476	113 064	113 000
Martinique, ponces	130 000	130 000	130 000	130 000	130 000
Nouvelle-Zélande	303 659	354 903	174 729	159 357	160 000
Philippines:					
Ponces	1 917	1 912	2 063	2 064	2 100
Tuff volcanique	17 590	16 490	17 570	18 830	20 000
Arabie Saoudite, pouzzolanes	400 000	784 000	810 000	800 000	800 000
Serbie, tuff volcanique	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
Slovénie, tuff volcanique	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Espagne (dont Canaries)	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000
Syrie, tuff volcanique	650 000	810 000	901 000	957 639	950 000
Tanzanie, pouzzolanes	129 295	184 070	260 403	61 501	70 000
Turquie	3 515 644	3 995 423	3 449 773	4 322 543	4 000 000
Ouganda, pouzzolanes	140 000	140 000	140 000	140 000	140 000
États-Unis	19 900 000	20 700 000	18 400 000	17 800 000	17 300 000
TOTAL	32 392 971	40 431 750	36 009 405	35 156 540	34 224 160

altération de certains blocs, et en surestime peut-être la proportion, compte tenu d'une information parcellaire à ce sujet. Dans tous les cas, même en ne prenant pas du tout en compte les blocs et en estimant que les $2,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ extraits par an en 2010 ne sont que du sable, on obtient un poids annuel de $3,4 \times 10^6 \text{ t}$ en 2010, ce qui avoisine la production de l'Italie ($3 \times 10^6 \text{ t}$ de pouzzolanes) et excède très largement celle de la plupart des autres pays cités, États-Unis exceptés. Cette valeur, du reste, n'intègre pas les volumes extraits sur les autres volcans indonésiens (Krakatau, Kelut, Semeru sur Java, Batur à Bali, Rinjani à Lombok). L'absence de l'Indonésie dans ce tableau est dû au manque de visibilité de l'activité, et à l'absence de structure d'encadrement officielle : la matière première ne s'exporte pas, seuls s'échangent les produits manufacturés issus de la transformation du sable en béton ou des blocs d'andésite en ornements architecturaux ou en sculptures.

Dans les pays développés, l'extraction des matériaux volcanoclastiques est encadrée, institutionnalisée, par des groupes privés ou publics. L'extraction et la vente des ponces en Grèce est effectuée par trois entreprises principales, Lava Mining & Quarrying Company (Grèce), Lafarge (France) et Cogebel (Belgique), qui obtiennent des concessions du gouvernement sur l'île de Nissiros. En Allemagne, l'exploitation des téphras du volcan Eifel à Laacher See est effectuée par Bisotherm. Aux États-Unis, seize entreprises minières de l'ouest du pays (Idaho, Oregon, Californie, Nouveau-Mexique, Arizona, Kansas) se répartissent l'extraction et la vente des ponces (Jaloux, 2012). Dans certains pays en développement, l'activité d'extraction semble au contraire mal définie, peu ou pas encadrée, et apparaît comme l'appropriation des espaces volcaniques par des populations qui ont besoin de ressource, car leurs conditions de vie sont difficiles. C'est dans ce type de contexte qu'une étude similaire à celle présentée ici peut être réalisée : étude de l'aléa, étude des extractions, des dangers dans les sites et de la place de l'activité dans les processus à l'origine du risque.

Mis à part l'Indonésie, deux pays producteurs de matériel volcanoclastique absents du tableau peuvent être cités : les Comores (Morin et Lavigne, 2009) et Montserrat (OPM, 2010 ; Melanie Froude, comm. orale, 2011 ; Figure 166). Dans ce dernier cas, l'activité d'extraction apparaît comme un moyen de subsistance pour les communautés locales affectées par les éruptions de 1997 et 2009-2010. Les informations sur les extractions sont tirées du rapport publié par Oxford Policy Management OPM (2010). Pendant des décennies, le sable noir des plages de l'ouest de l'île a été utilisé comme matériel de construction par les communautés locales (Gunne-Jones et Christopher, 1998). Le regain d'activité de Soufriere Hills à partir de 1995 a été marqué par des phases de croissance de dôme andésitique suivies d'effondrement rappelant les dynamiques éruptives du Merapi. Les coulées pyroclastiques provoquées par les effondrements de dôme ont déposé près de $200 \times 10^6 \text{ m}^3$ entre 1998 et le milieu des années 2000 (Edmonds *et al.*, 2006). Les deux tiers méridionaux de l'île, comportant notamment la capitale Plymouth et les meilleurs terroirs, ont été condamnés et ne sont désormais plus accessibles. En réponse à ces impacts sociaux et économiques traduits par une réduction drastique de l'espace de l'île, les habitants de Montserrat ont massivement émigré vers le Royaume-Uni (Pattullo, 2000 ; Rozdilsky, 2001 ; Mitchell, 2002). Ceux qui sont restés ont fait face à une situation économique dégradée : l'exploitation de la ressource volcanoclastique est devenue une solution adaptée, et semble avoir commencé aux alentours de l'année 2002 sur l'est de l'île à Trant's Bay, identifié comme le principal site d'extraction en 2008 (Figure 166).

2.2 Un révélateur de difficultés sociales et économique ? Le cas de Montserrat (Antilles)

Neuf entreprises d'extraction se partagent le marché ; de taille réduite, elles comptent chacune moins d'une dizaine de salariés permanents, contre un nombre très variable de saisonniers. Au total, les extractions offrent officiellement un emploi stable à une cinquantaine de personnes seulement.

DES CLÉS DE LECTURE PERTINENTES POUR L'ANALYSE DES RISQUES SUR UN VOLCAN ACTIF ?

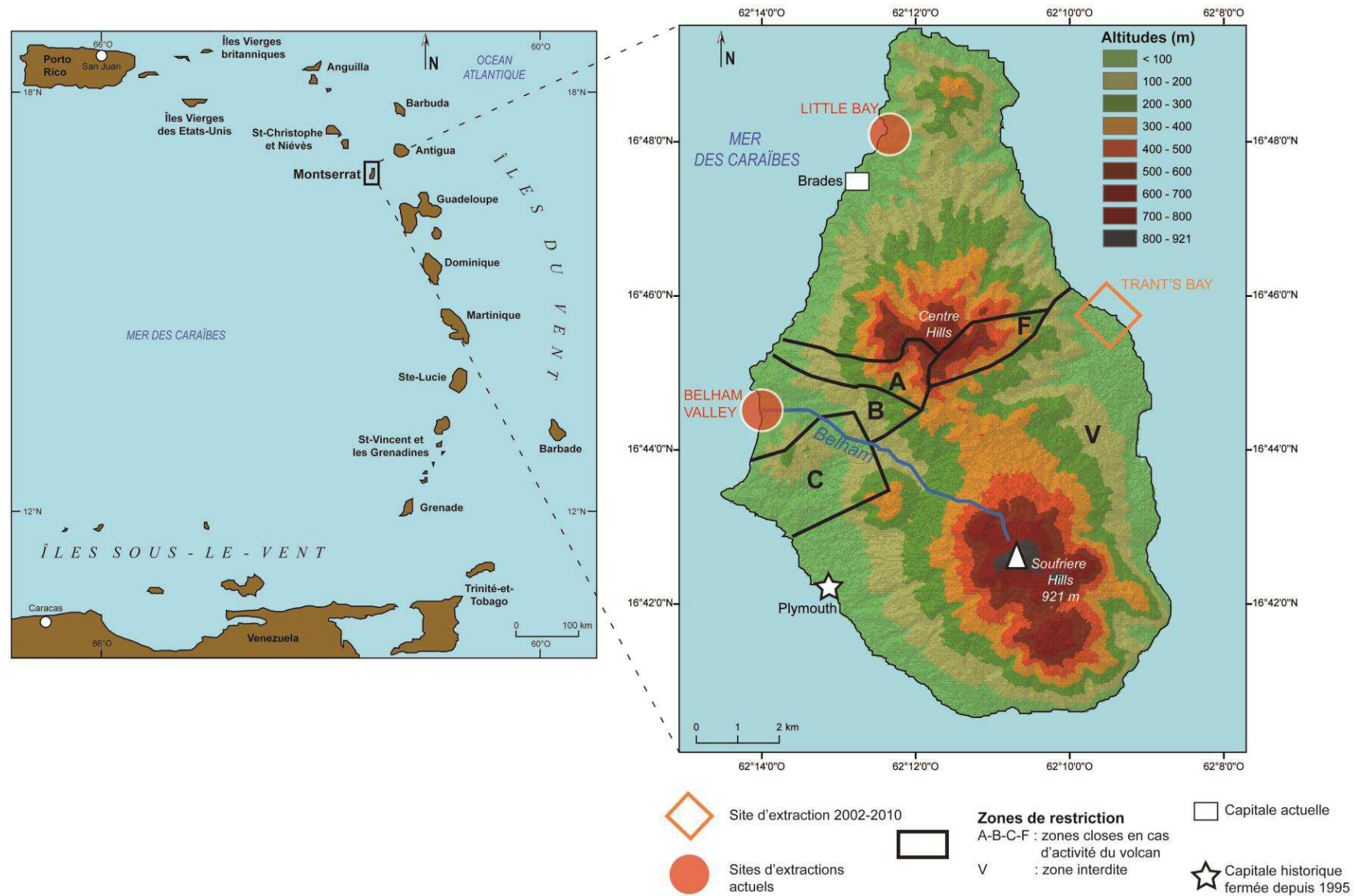


Figure 166 – Localisation des sites d'extractions de dépôts volcanoclastiques à Montserrat (fond de carte : modèle numérique de terrain ASTER GDEM)

Les extractions étant mécaniques, le rapport OPM ne compte effectivement pas les travailleurs indépendants, qui exploitent les dépôts de la vallée Belham de manière irrégulière, généralement pour leur utilisation personnelle ou bien pour alimenter un commerce parallèle local. Son poids n'est pas connu, mais semble assez restreint spatialement et économiquement. L'essentiel de la production est le fait des neuf entreprises, dont le pic d'activité a eu lieu en 2007 avec 220 000 t de sable et d'agrégats extraits, dont 170 000 t destinées à l'exportation, représentant 99,7% des exportations industrielles de l'île. La concurrence avec les granulats provenant de la République Dominicaine, la Guyana et la Barbade est assez rude, mais Montserrat parvient à demeurer un acteur essentiel de l'export de sables volcanoclastiques dans les Caraïbes. Le sable est vendu dans l'ensemble de l'espace caribéen, principalement à Anguilla (47%) et à Saint-Christophe-et-Niévès (35%) avec des bénéfices avoisinant les 5,1 millions de DCO (Dollar des Caraïbes Orientales) soit 1,4 millions d'euros. Le prix à la tonne est de 30 DCO (8,4 €), ce qui est près de 3 fois la valeur du sable au Merapi, vendu en 2007 à 50 000 Rp le m³ soit 31250 Rp ou 2,7 € la tonne. Toutefois, l'activité bien plus intense au Merapi produit des bénéfices annuels dix fois supérieurs à ceux de Montserrat (chap. 6).

Après l'éruption volcanienne du volcan Soufriere Hills en 2010, des dépôts pyroclastiques brûlants recouvrent la rivière Tar jusqu'à Trant's Bay, et nécessitent la fermeture du site. Deux entreprises qui ont perdu de nombreux outils et véhicules dans l'éruption ont fait faillite, et n'ont pas pu suivre la migration qu'ont entamée les sept autres compagnies minières vers la partie occidentale de l'île. Les nouveaux sites d'extraction se situent désormais principalement le long de la rivière Belham, régulièrement alimentée par des lahars depuis les coulées pyroclastiques de 2006 (Alexander *et al.*, 2010), mais aussi au nord de l'île, à Little Bay. Le matériel y est de moins bonne qualité, puisqu'il s'agit essentiellement de sables et de blocs épiciastiques altérés, mais il a le mérite d'être situé à proximité de la nouvelle capitale de l'île, Brades, et juste à côté du principal port d'exportation des sables, ce qui limite les coûts de transport.

Les lahars de la Belham, principal corridor exploité (Figure 167), semblent assez similaires à ceux du Merapi, avec des débits de pointe enregistrés à $Q_p = 200$ à $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, et des dépôts assez grossiers caractérisés par des textures sableuses à médiane $-1 \phi < Me < 1,5 \phi$ (Barclay *et al.*, 2007 ; Alexander *et al.*, 2010). Toutefois, en dépit de cette ressource régulièrement renouvelée, la production a considérablement chuté, atteignant 30 000 t en 2010, mais semble retrouver un certain dynamisme en 2011 (M. Froude, comm. orale et orale, 2011). La part des travailleurs non-déclarés est difficile à établir, et ce en raison d'une législation assez opaque, tout comme au Merapi. Certes, la présence d'entreprises bien déclarées, entretenant des comptes précis, permet de mieux appréhender l'activité à Montserrat qu'en Indonésie, où l'encadrement des extractions est quasiment absent, mais ne suffit pas à en estimer les effectifs réels. La législation de l'activité à Montserrat souffre de quelques zones d'ombre : le permis n'est obligatoire que dans les *crown lands* (littéralement, « domaine royal », correspondant aux espaces publics inaliénables des territoires du Commonwealth), mais n'est pas nécessaire dans les propriétés privées, au sein desquelles l'extraction peut se faire sans contrôle étatique. Il n'existe pas de planification raisonnée de l'activité, notamment parce que le bureau chargé d'encadrer l'activité et les sites d'extraction n'a pas les moyens humains et financiers d'en effectuer la surveillance et la gestion. Enfin, la corruption est, tout comme au Merapi, un frein majeur au développement de l'activité, notamment parce que les milieux politiques de l'île sont très liés aux principaux cadres des entreprises d'extraction. Cela donne lieu à une redistribution assez floue des bénéfices dégagés par l'exportation, ainsi qu'à des tractations financières inexplicables : à quel titre deux compagnies ont-elles bénéficié d'une pleine exemption de leurs taxes pour une douzaine d'années en 2011 ?

Tout comme au Merapi, l'activité d'extraction – encore qu'à une échelle moindre, avec moins de travailleurs, moins de sites et moins de volumes exploités – produit d'importants bénéfices qui mériteraient d'être valorisés car ils peuvent apporter des solutions durables à une économie locale

perturbée par les éruptions volcaniques. Toutefois, les modes de gestion frauduleux rendent cette manne contre-productive, l'absence de régulation en empêche la rationalisation et peut, à terme, affaiblir plutôt que renforcer les capacités des communautés. Le rapport OPM termine effectivement en énumérant les différents impacts négatifs des extractions mal régulées de Montserrat : routes endommagées (camions surchargés, risques d'accidents de la route), nuisances sonores et dégagement de poussière (les villages localisés le long de la Belham perdent en qualité de vie et certains résidents songent à déménager), problème de ressource en eau (trous et levées perturbent le fond de vallée et la localisation du talweg), impacts sanitaires (respiratoires), exposition augmentée aux aléas volcaniques, notamment aux coulées et déferlantes pyroclastiques, ainsi qu'aux lahars.



Figure 167 – Corridor de lahars et extraction des dépôts volcanoclastiques à Montserrat.
A : Le corridor de lahars de la Belham, à l'ouest de Montserrat (cliché H. Odbert, 2011). B : techniques d'extraction par tractopelles, lesquelles ne sont pas utilisées au Merapi (cliché M. Froude, 2011).

D'ailleurs, l'accès aux sites de la Belham Valley est théoriquement soumis à restriction : il s'agit de la zone B, laquelle, avec les zones A, C et F est interdite à l'occupation humaine en cas d'activité volcanique élevée. La situation était similaire au Merapi : avant l'éruption de 2010, l'accès au site d'extraction de Jambu-Kaliadem sur le talus proximal du volcan était théoriquement interdit. Dans les deux cas, l'activité théoriquement encadrée est en réalité très informelle, plus peut-être au Merapi, où la fragmentation territoriale empêche une vision d'ensemble et une gestion concertée de l'activité.

On comprend donc que la situation de Montserrat est, à une échelle plus réduite, assez identique à celle du Merapi. Une évaluation des dangers dans les sites d'extraction de la Belham pourrait s'avérer profitable pour améliorer la gestion des risques liés aux lahars et aux aléas volcaniques de la Soufriere Hills, mais aussi pour mieux saisir l'ensemble des interactions sociales, économiques et environnementales existant sur les espaces du volcan, et éclairer plus en détail la vulnérabilité de ses habitants.

CONCLUSION

RISQUES ET RESSOURCE : LA NÉCESSITÉ D'UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE

La troisième et dernière partie de la thèse a présenté les résultats de plusieurs méthodes d'enquêtes visant à comprendre, à reconstituer et à analyser le fonctionnement des extractions de dépôts de lahars au Merapi. Cette partie s'est notamment intéressée à la dimension spatiale de cette activité, en définissant les sites d'extraction, et en cherchant à y évaluer les risques qui y existent. Mais elle a également cherché à comprendre son fonctionnement social et économique de l'activité.

À l'aide de comptages et d'enquêtes réalisés sur le terrain, prolongés par l'étude de mémoires universitaires, de rapports collectés dans les différentes institutions des districts du Merapi, la localisation des sites d'extraction a pu être retrouvée, et les rythmes de l'exploitation estimés en fonction du nombre de camions recensés par jour. Malgré de nombreuses lacunes, l'évolution de l'activité a été quantifiée. De même, plusieurs entretiens ont permis de bien saisir le fonctionnement des extractions, qui apparaissent comme un élément économique fondamental au Merapi tant les bénéfices sont élevés, mais qui souffre d'un manque d'encadrement qui nuit à son efficacité. À l'aide d'un questionnaire réalisé six mois après l'éruption de 2010, les principales mutations de l'activité ont été mises en évidence. Les réponses ont été à l'origine d'une évaluation des risques par le calcul d'un indice composite à l'échelle des sites d'extraction. La carte finale du chap. 7 (Figure 163) matérialise l'intérêt d'une vision multiple des différents types d'espaces à risque liés aux lahars, en associant les territoires institutionnels (communes) et les sites d'extraction qui n'ont encore jamais été intégrés, ni même mentionnés, dans les cartes « de risque » préexistantes. L'approche du risque par la ressource que permet l'étude des sites d'extraction dans les corridors de lahars est ainsi un axe de recherche à valoriser dans le cadre d'espaces volcaniques très peuplés et exploités. En effet, elle permet une vision d'ensemble qui nécessite une analyse systémique des différents éléments en ligne de compte.

Au final, la compréhension et la modélisation du système permettent de mettre en évidence une double temporalité d'impacts de l'activité d'extraction : d'abord, une phase de bénéfices, lorsque s'organise ou se réorganise l'exploitation après une éruption. Mais au bout de quelques années, les défauts structurels de l'activité en grève le développement durable ; elle apparaît alors au contraire contre-productive, au point de devenir elle-même un facteur de vulnérabilité à l'échelle du volcan. L'exemple de Montserrat détaillé en conclusion montre que le cas du Merapi étudié dans cette thèse n'est pas un exemple isolé, et l'étude des risques à partir de l'étude des extractions peut s'avérer un moyen de recherche intéressant, permettant :

- De mieux comprendre l'aléa en étudiant la ressource
- De mieux saisir le fonctionnement socioéconomique de l'espace envisagé
- De préciser les cartes de risques en y intégrant un type d'espace souvent peu voire pas envisagé
- De faire apparaître d'autres facteurs de vulnérabilité méconnus.

Pendant les saisons des pluies à venir, le risque sera maximal dans les parties distales de la Gendol et de la Putih, bien que la Boyong et la Krasak ne soient pas à négliger. Les autorités auront tout intérêt à prendre en compte les sites d'extraction dans la réalisation de « cartes de risque », en actualisant les données présentées tout au long de cette partie 3. Des études ultérieures seront à mener, au Merapi ou sur un espace de volcan composite tropical, pour y continuer ce type d'analyse systémique entre l'aléa et la ressource, entre le risque et le bénéfice, et ainsi mieux comprendre les processus qui peuvent vulnérabiliser ou renforcer une communauté face aux aléas volcaniques.

CONCLUSION GÉNÉRALE



Sable du Merapi devant une maison à Jambu, cliché D. Grancher, août 2009

Conclusion générale

Quel est l'intérêt d'une double analyse des lahars à la fois comme aléas, mais aussi comme les vecteurs d'une ressource, dans la compréhension des risques sur le volcan Merapi ?

Au terme de cette thèse qui s'est intéressé aux impacts géomorphologiques et socioéconomiques des lahars du Merapi, quels ont été les principaux résultats et quelles sont les perspectives de recherche à venir ?

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Les principaux résultats de la thèse ont eu pour fil rouge l'étude de la formation des corridors de lahars et des enjeux de leur mise en valeur économique. Il s'agit de la marque spatiale des très fréquents lahars qui se sont produits après l'éruption de 2010, notamment dans la partie distale des rivières, qui n'avait pas connu de tels événements depuis plusieurs décennies ; il s'agit aussi du principal espace de risque au Merapi après l'éruption de 2010. Ces corridors sont formés par des processus rapides d'incision et d'élargissement des chenaux existants, mais aussi par des dynamiques de défluviation, de débordement et d'aggradation qui ne sont pas sans danger pour les espaces riverains. Un lahar comprend en réalité plusieurs processus possibles, variables dans le temps et dans l'espace, liés à des conditions géomorphologiques (pente, forme des cours d'eau), rhéologiques (concentration sédimentaire et énergie du flux) et climatiques (intensité des précipitations). La mesure à échelle locale des impacts morphodynamiques des lahars permet de les appréhender dans leur variété, et de comprendre quels sont les dangers qui menacent les populations riveraines à l'échelle du volcan. Cela permet de dresser un premier diagnostic des communes exposées aux lahars et aux différentes dynamiques géomorphologiques qu'ils induisent. La thèse a montré que c'est dans la partie distale que le danger est le plus élevé. En outre, les résultats d'un questionnaire de perception et de connaissance de l'aléa lahar adressé en décembre 2010 à 630 riverains de 12 rivières du Merapi ont montré que c'est souvent dans les communes de leur partie aval que la connaissance de l'aléa et de ses processus est la plus mauvaise.

Les dégâts causés par les lahars sont la manifestation tangible du danger qu'ils peuvent représenter. Les dommages survenus pendant la saison des pluies 2010-2011 concernent d'abord les habitations : 860 maisons endommagées dont 215 entièrement détruites et/ou ensevelies dans 7 communes, y compris dans le centre-ville de l'agglomération de Yogyakarta. Près de 3000 personnes ont directement subi les dégâts des lahars, principalement à Sirahan, commune située à une vingtaine de kilomètres à l'ouest du cratère le long de la rivière Putih. Avec 217 habitations endommagées et 37 détruites, cette commune totalise le plus de dommages ; le chapitre 4 y a détaillé les différents types d'endommagement existant à l'échelle des villages appartenant cette

commune. Les lahars y ont provoqué une situation d'urgence quasi-permanente pendant la saison des pluies 2010-2011, marquée par la réouverture de trois centres d'évacuation initialement prévus pour les crises éruptives. Les perturbations provoquées par les lahars ont été renforcées par les ruptures de réseau répétées qu'ils ont provoqué sur la quatre-voie Yogyakarta-Semarang, obligeant à une redistribution fastidieuse des flux, ainsi que par l'ensevelissement de plus de 70 ha de surfaces agricoles. Face à cette situation d'urgence, d'autant plus complexe qu'elle ne joue pas à l'échelle d'un seul bassin-versant, mais à celle du Merapi, avec des répercussions à plus petite échelle encore, les populations locales ont néanmoins réussi à s'organiser pour mettre en œuvre un système de surveillance et d'alerte, permis notamment par les nouvelles technologies de l'information et de la communication qui facilitent le suivi efficace en temps réel des différentes rivières. Enfin, la mise en place des corridors de lahars s'accompagne du transfert et de la déposition du matériel volcanoclastique. Les dépôts représentent un volume minimum de 26 millions de m³, estimé d'après des mesures de terrains et la cartographie des dépôts. Les lithofaciès montrent des structures et textures sédimentaires typiques des coulées de débris et des écoulements hyperconcentrés. L'étude des faciès sédimentaires traduit une prédominance du matériel grossier, avec des évidences de coulées de débris s'étendant jusque sur le talus distal, notamment dans la Pabelan, même si une tendance à la dilution dans d'autres bassins-versants (Putih, Opak) est visible. Les lithofaciès permettent de mieux individualiser les bassins-versants où des lahars intenses sont susceptibles de menacer des espaces loin en aval. L'analyse granulométrique plus précise de la fraction fine échantillonnée dans plusieurs sites depuis le talus proximal jusqu'au talus distal montre que les sables volcanoclastiques du Merapi sont des sables grossiers à très grossiers, exceptionnellement des sables moyens, ces derniers étant situés sur le talus distal du volcan. La seconde partie de la thèse a ainsi montré pourquoi les lahars représentent un risque après l'éruption de 2010, en insistant sur la formation de leurs corridors, et ses conséquences.

La dernière partie de la thèse présente et discute la mise en valeur économique des corridors de lahars, à l'intérieur desquels se créent des sites d'extraction. Le fonctionnement de ces espaces est expliqué, suivi par un historique de l'activité, à travers la reconstitution des volumes extraits au cours de la décennie 2000, l'explication de ses problèmes de gestion et de ses impacts. Il s'agit d'une activité méconnue, mais pourtant très importante au Merapi : elle représente un complément de revenu substantiel, et elle est à l'origine de flux commerciaux dont les réseaux rayonnent à l'échelle nationale et même internationale, notamment pour les sculptures d'andésite. C'est une activité qui apparaît aussi bien mal mise en valeur : elle fait du Merapi un espace polarisant, attirant à lui des travailleurs venant de loin, mais sans que soit proposé un modèle de gestion capable d'en assurer le développement. Le dernier chapitre étudie l'adaptation très rapide de l'activité aux mutations environnementales qu'a provoquées l'éruption de 2010 à l'aide d'un questionnaire auquel ont répondu 733 travailleurs dans 15 sites d'extraction sur l'ensemble du Merapi. Les données ont été également exploitées et associées à des observations de terrain et à la fréquence de l'aléa pour élaborer un indice de risque composite, fondé selon l'équation posant que $\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Enjeux}$. Cet indice quantifie à l'aide de scores théoriques la valeur du risque pour chaque site d'extraction, permettant un classement et une explication des causes du danger. Le chapitre 7 s'achève d'une part par la réalisation d'une carte présentant les différents espaces du danger lié aux lahars du Merapi : communes exposées aux différents processus morphodynamiques des lahars et sites d'extraction. C'est la première tentative d'intégration des sites d'extraction en tant qu'objets spatiaux dans une carte étudiant les dangers liés aux lahars. La carte met en

avant les rivières le long desquelles le risque est élevé, et met également en lumière les communes pour lesquelles la vigilance doit être permanente, notamment celles qui combinent exposition forte aux lahars et sites d'extraction dangereux. Elle peut ainsi servir de base à toute étude ultérieure de réduction des risques liés aux lahars du Merapi. Enfin, la partie 3 s'achève sur une remise en perspective de l'activité d'extraction au sein du complexe aléa-vulnérabilité-enjeux, permettant une analyse systémique du risque au Merapi intégrant cette activité importante, dont l'aspect peu durable et la mauvaise gestion provoquent des impacts défavorables à long terme au développement socioéconomique. L'activité d'extraction tend à déstructurer en partie les communautés du Merapi, qui risquent de devenir dépendantes d'une ressource aléatoire.

APPORTS DE LA THÈSE

Une approche globale des lahars du Merapi

Si l'objectif premier était de fournir une étude complète de l'activité et des sites d'extraction pour en quantifier les impacts environnementaux et socioéconomiques, l'éruption explosive de 2010 a conduit à déplacer le cœur de l'analyse non plus seulement vers les conséquences des extractions, mais surtout vers leurs causes. Toute la seconde partie de la thèse se fonde sur une base de données constituée pendant la mission de terrain de janvier à juillet 2011, partiellement complétée ensuite par des étudiants de Master de novembre 2011 à février 2012. Le détail des occurrences de lahars y est assez fiable, la plupart des informations provenant des archives du BPPTK, les autres étant recoupées d'après des témoignages et quelques coupures de presse. Ce travail de compilation permet une vision globale de l'aléa lahar sur l'ensemble du Merapi, en donnant la chronologie (jour et heure) des principaux événements, associée à quelques mesures physiques (intensité des précipitations et profondeur des lahars) et aux dommages associés. La base de données elle-même représente un fond d'information qui pourra être repris par des études ultérieures.

Une approche systémique englobant l'aléa et la ressource

Les lahars survenus après l'éruption de 2010 du Merapi ont montré l'importance de la temporalité dans l'étude des processus et des risques sur un volcan actif tropical. Au temps de l'éruption, pendant lequel les aléas se produisent durant quelques semaines, succède le temps des lahars pluviaux, qui peut s'étaler sur une période de plusieurs années, et qui concerne essentiellement les espaces du talus distal, lesquels sont généralement épargnés par les aléas éruptifs et moins fréquemment sujets aux situations d'urgence. La prise en compte de cette temporalité joue sur deux niveaux : d'abord la compréhension et la spatialisation du risque existant, mais aussi l'étude dynamique des éléments pouvant, sur le plus long terme, augmenter ou réduire ce risque. L'un des principaux facteurs du risque, la vulnérabilité, n'est pas une situation statique, mais elle est au contraire l'expression de processus sociaux et économiques qui évoluent dans le temps vers une amélioration ou vers une dégradation. L'intégration de la problématique de la ressource est une entrée probante pour saisir l'aspect évolutif de la vulnérabilité. Cette notion repose effectivement sur l'idée que sont vulnérables les communautés n'ayant pas les moyens de subsistance nécessaires pour avoir la capacité de faire face aux aléas naturels ; c'est donc en étudiant leurs ressources que l'on peut

caractériser leur vulnérabilité. Cette approche s'inscrit dans le paradigme radical de la géographie des risques (O'Keefe *et al.*, 1976 ; Hewitt, 1983 ; Wisner et Luce, 1993 ; Gaillard, 2008 ; Texier *et al.*, 2009), et offre l'opportunité d'aborder la vulnérabilité d'une manière synthétique (Dauphiné, 2004).

L'extraction du matériel volcanoclastique est une activité qui facilite l'approche des temporalités du risque : d'une part parce qu'elle se pratique sur des espaces particuliers, les sites d'extractions, où les travailleurs sont exposés aux aléas. D'autre part parce qu'elle permet d'amorcer une réflexion sur la place qu'elle occupe dans la vie quotidienne et les ressources des communautés du Merapi : pourquoi cette activité ? Est-elle importante ou ponctuelle ? Rapporte-t-elle des revenus élevés ? En s'intéressant à ses impacts sociaux et économiques sur le long terme, il est possible d'en déduire si elle contribue à augmenter la capacité, ou au contraire à exacerber la vulnérabilité. Ainsi, l'intérêt d'une double analyse des lahars, à la fois comme aléas et comme vecteurs de ressource, permet d'une part d'aborder d'une les risques à plusieurs échelles spatiales et temporelles, et d'autre part de réfléchir aux différents facteurs du risque dans l'optique d'une approche systémique. La thèse a montré que le système du risque pouvait être enrichi par l'ajout de l'activité d'extraction, qui dévoile des interactions avec les trois facteurs du risque. L'exploitation des dépôts volcanoclastiques amène l'exposition artificielle des travailleurs à l'aléa, puisque l'espace dans lequel celui-ci survient est également l'espace de travail. L'activité, en outre, y démultiplie les enjeux : outre la forte fréquentation, de nombreux véhicules et outils mécaniques sont potentiellement menacés. Enfin, les extractions, mal encadrées et peu durables, provoquent à terme divers problèmes notamment sociaux et économiques à l'échelle du Merapi qui contrebalancent les compléments de revenus qu'elles peuvent représenter. Il s'agit donc d'une activité permettant une compréhension plus détaillée du risque lié aux lahars du Merapi, en abordant l'ensemble des espaces menacés et en ayant un aperçu dynamique sur les processus de vulnérabilisation sociale.

Une méthode d'analyse transposable ?

À l'issue de cette thèse se pose la question de sa singularité : présente-t-elle une analyse des risques pouvant être reproduite sur un autre volcan actif ?

Force est de constater que le Merapi est un cas d'étude original à bien des égards :

- Le contexte postéruptif après l'éruption de 2010 offre un cas d'étude singulier, avec une fréquence d'occurrence des lahars particulièrement élevée dans un grand nombre de bassins-versants.
- Ce volcan est situé à moins de 30 km d'une agglomération de plus d'un million d'habitants, qui correspond en outre à l'ancien centre historique de la culture javanaise. Le volcan est ainsi peuplé depuis plusieurs siècles, et bénéficie d'une position géographique et culturelle qui n'a jamais été marginale. Il est au carrefour de deux axes de communication structurants pour l'île de Java, et est très densément peuplé. Les produits de ses éruptions ont fourni la fameuse « pierre des temples » qui est une ressource bien plus célèbre que ne le sont les téphras d'autres volcan, tels ceux du Krakatau ou le sable du Semeru. Ces deux derniers volcans, d'ailleurs, sont excentrés par rapport aux axes de circulation – l'Anak Krakatau est même situé sur une île dont l'accès est réglementé (Thornton, 2000) – et sont plus éloignés des grands centres urbains, limitant le dynamisme des sites d'extraction.

L'étude des risques réalisée ici s'appuie sur un indice composite. Toutefois, celui-ci prend sens dans le contexte du Merapi : il n'est pas possible d'appliquer tels quels les seuils et les scores de vulnérabilité et d'enjeux tels qu'ils ont été définis ici. Ce problème empêche donc toute transposition immédiate de ces indices, qui n'ont qu'une valeur locale. Toutefois, le cas de Montserrat abordé dans la discussion de la partie 3 met en avant l'existence de l'extraction des dépôts volcanoclastiques qui rappelle celle du Merapi : une activité qui se pratique dans des corridors de lahars, qui joue un rôle économique certain dans l'économie locale mais qui subit l'emprise de la corruption, et une activité qui doit se réadapter à l'activité volcanique lorsque des sites sont inaccessibles après une éruption. Il semble dès lors possible d'adapter l'approche développée dans cette thèse : d'abord en étudiant le fonctionnement des corridors de lahars pour cibler les zones dangereuses, répertorier quelles parties de ces corridors sont exploitées, et bâtir un indice composite pour cibler les sites où le risque est élevé. Enfin, à partir des impacts sur le temps long de l'activité d'extraction, évaluer ses interactions avec les différents facteurs du risque et donc en déduire le rôle qu'elle peut jouer dans une appréciation systémique et dynamique du risque.

Le cheminement multiscalaire et systémique qu'a adopté cette thèse peut donc être réalisé ailleurs ; l'un des intérêts d'une éventuelle reprise résiderait d'ailleurs dans le choix des seuils de vulnérabilité et d'enjeux et de leur pondération. Il est également possible d'extrapoler le thème de la ressource pour ne pas s'intéresser qu'aux seules extractions, dès lors qu'il existe une exploitation sur un espace exposé aux aléas tels que les corridors de lahars. On peut songer notamment à l'exploitation minérale du soufre dans le cratère du Kawah Ijen (Java), mais aussi, dans un autre ordre d'idée, à la mise en valeur touristique des volcans et à l'exposition de personnes mal informées (Bird *et al.*, 2009, cf. chap. 1). Il est ainsi possible d'ajouter plusieurs types d'espaces à risque aux cartes existantes, en fonction des différents usages et des différents usagers des espaces d'un volcan pour aboutir à une meilleure compréhension du risque.

BILAN DE LA THÈSE

D'un programme à l'autre : de MIA VITA à SEDIMER, les perspectives de recherche

La forte fréquence des lahars qui ont suivi l'éruption de 2010 nécessite le déploiement d'une instrumentation à la fois nombreuse et variée qui n'existe pas ou plus pour pouvoir étudier d'une manière complète les lahars, notamment leurs caractéristiques physiques. Au début de l'année 2012, le projet de recherche international SEDIMER (SEdiment-related DIasters following the 2010 centennial eruption of MERapi volcano) entièrement consacré aux lahars du Merapi et financé par le Fonds de Recherche AXA a été officiellement lancé par Franck Lavigne (Paris 1 – UMR 8591 Laboratoire de Géographie Physique). L'objectif du programme est d'aborder l'ensemble des risques liés aux lahars, depuis le talus proximal vers le talus distal du volcan, insistant sur :

- Les processus de déclenchement des lahars
- La dynamique rhéologique et la modélisation
- Les impacts sur le transport solide des rivières en aval
- Analyse de la vulnérabilité physique et socioéconomique
- Étude de la gestion de crise

La thèse était initialement prévue comme partie intégrante du programme MIA VITA, auquel elle a apporté des informations sur le rôle des extractions dans la vulnérabilité au Merapi, mais elle a également suivi l'élaboration du projet de SEDIMER, dans lequel elle s'insère : la base de données est réutilisable et appelle à être complétée ; l'étude des corridors de lahars et l'analyse de leur mise en valeur offrent des résultats mais aussi des pistes d'investigation pour les équipes qui travailleront sur la dynamique fluviale, sur la vulnérabilité et sur la gestion de crise. Une nouvelle étude de connaissance de l'aléa et de perception pourra être réalisée, notamment pour étudier les éventuels effets de la forte récurrence des lahars en 2010-2011.

Le programme a prévu également de toujours s'intéresser au problème des extractions en prolongeant les résultats déjà fournis dans cette thèse. Comme déjà suggéré lors de la discussion de la partie 3, les indices de risque sont à actualiser régulièrement, notamment si de nouveaux sites d'extraction sont ouverts. En outre, certaines données obtenues par le questionnaire de 2011 seront réutilisées pour aboutir à des recherches détaillées, notamment celles concernant les impacts des extractions sur la santé des travailleurs. Les analyses de Damby *et al.* (sous presse) de plusieurs échantillons provenant des sites d'extraction du Merapi montrent que les travailleurs ont tendance à respirer un air saturé d'éléments volatils, qui peut représenter un risque élevé de tuberculose à cause de la présence de cristobalite dans les dépôts riches en SiO₂ du Merapi. L'abondance de silice est connue pour aggraver les symptômes de la tuberculose, exacerbée du reste par la fumée des cigarettes sans filtre qu'ont l'habitude de consommer les travailleurs. Nous envisageons d'ailleurs un partenariat avec P. Baxter (Cambridge) et S. Jenkins (Bristol) pour mettre au point un protocole d'enquête permettant de prolonger l'analyse des risques au Merapi en abordant la question des risques sanitaires. Les sites d'extraction appellent donc une série d'études complémentaires pour actualiser les résultats présentés dans cette thèse, et ouvrent de nombreuses pistes d'étude. Ces différents projets traduisent bien l'aspect essentiel de l'activité d'extraction au Merapi, qui légitime la place que lui a accordée cette thèse dans l'étude des risques liés aux lahars.

L'implication sur le terrain

Les travaux de terrain n'ont pas été seulement dévolus à la recherche de données, mais ont été l'occasion, surtout après l'éruption du Merapi, d'échanges directs avec les populations du Merapi et d'une implication dans la réalisation de certains projets (Tableau 47). La méthode d'acquisition de données par entretiens a été prolongée par la volonté de ne pas être uniquement un chercheur extérieur au phénomène investigué, mais de s'intégrer directement aux différents groupes évoqués et rencontrés. Cela a permis de récolter une plus grande masse d'information que les entretiens parfois ne dévoilent pas toujours, et de mettre à profit ses connaissances pour un partage profitable de points de vue, afin d'ancrer la recherche dans la réalité du terrain qu'elle investigate, et donc de lui trouver des applications directes. Cette démarche s'apparente par certains côtés à la recherche-action, de par notre implication dans la sensibilisation voire la formation des jeunes volontaires qui participent à la gestion de crise. Il est notamment apparu essentiel de participer aux entreprises de réduction des risques afin de mieux les comprendre. Cette approche a été le vecteur privilégié d'échanges fructueux permettant de mieux appréhender la réalité du terrain, de mieux saisir le fonctionnement des lahars et de la manière dont ils sont gérés. Les liens noués avec plusieurs acteurs scientifiques, des riverains, des membres d'ONG, des tenanciers de *warung* de sites d'extractions, des

mineurs, ont permis la constitution d'un réseau d'information qui a pu être utilisé pour compléter la base de données.

Le travail de terrain a donc été grandement facilité par les multiples rencontres qui y ont été faites, et qui ont pu être valorisées aussi bien scientifiquement qu'humainement. Au moment où s'achève ce travail, il semble important d'en mentionner l'un de ses principaux sur le plan personnel : travailler sur les risques permet de partir à la rencontre de populations, d'essayer d'en comprendre le quotidien, d'en caractériser les forces et les faiblesses. À l'expérience scientifique de la thèse se conjugue l'expérience humaine, dont la réussite joue pour une bonne part dans l'achèvement du projet. La thèse est terminée, mais les contacts noués sur le terrain méritent d'être valorisés ultérieurement, dans le cadre du projet SEDIMER ou dans d'autres programmes à venir, au Merapi, en Indonésie, ou ailleurs. Le cas de Montserrat développé en discussion de la troisième partie de la thèse est un exemple des opportunités qui peuvent s'ouvrir pour prolonger et enrichir la thématique de recherche que ce travail a développé.

Tableau 47 - Implication et partage d'information pendant le terrain de thèse (2011)

Groupe	Participation
Scientifiques – BPPTK	Communication des données sur l'extraction des matériaux volcaniques Rédaction d'articles scientifiques dans des revues à comité de lecture
ONG – Pecinta Alam	Reconnaître les zones de danger : mise en évidence sur le terrain du matériel remobilisable en amont de la Boyong et de la Opak. Communications à des réunions de sensibilisation à Yogyakarta (Code), dans des villages de la Gendol. Participation à une campagne de délimitation de voies d'évacuation le long de la Code à Yogyakarta.
Communauté d'habitants – KKBS	Communication à des réunions de sensibilisation à Yogyakarta (Code).
Bénévoles	Aide à la surveillance des rivières (Gendol) Aide au déblaiement et au nettoyage après le passage d'un lahar (Opak)

Bibliographie

ARTICLES ET OUVRAGES SCIENTIFIQUES

- Abasi S.H., 1996. Lahar behaviour of Merapi volcano and its associated effects on the environment between Krasak and Boyong Rivers, in Sleman District. Master's degree in Physical Geography, Department of Mathematics and Natural Sciences, UGM, Yogyakarta, p 72-166.
- Abdurachman E.K., Bourdier J.L., Voight B., 2000. Nuées ardentes of 22 November 1994 at Merapi volcano, Central Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 345-361.
- Aceves-Quesada J.F., Del Pozzo A.L.M., Blanco J.L., 2006. Volcanic hazards zonation of the Nevado de Toluca Volcano, Mexico. *Natural Hazards*, 41, 159-180.
- Aguilera E., Pareschi M.T., Rosi M., Zanchetta G., 2003. Risk from lahars in northern valleys of Cotopaxi volcano (Ecuador). *Natural Hazards*, 33, 161-189.
- Alfieri L., Salamon P., Pappenberger F., Wetterhall F., Thielen J., 2012. Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21, 35-49.
- Alzwar M., 1986. Geothermal energy potential related to active volcanism in Indonesia. *Geothermics*, vol. 15, 5-6, p. 601-607.
- Anderson M., Woodrow P., 1989. *Rising from the ashes: development strategies in times of disasters*. Westview, Boulder & San Francisco, UNESCO, Paris, 338 p
- Anderson W. A., 1969. Disaster warning and communication processes in two communities, *Journal of Communication*, 19, 92-104.
- Andreastuti S.D., Alloway B.V., Smith I.E.M., 2000. A detailed tephrostratigraphic framework at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: implications for eruption predictions and hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 51-67.
- Arattano M., 1999. On the Use of Seismic Detectors as Monitoring and Warning Systems for Debris Flows. *Natural Hazards*, 20, 197-213.
- Arattano M., Marchi L., Cavalli M., 2012. Analysis of debris-flow recordings in an instrumented basin: confirmations and new findings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 679-686.
- Arboleda R.A., Martinez M.M.L., 1996. 1992 lahars in the Pasig-Potrero River system. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Arguden A.T., Rodolfo K.S., 1990. Sedimentologic and dynamic differences between hot and cold laharc debris flows of Mayon Volcano, Philippines. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 865-876.
- Arnórsson S., 2000. Exploitation of geothermal resources. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1243-1258.

- Bahar I., 1984. Contribution à la connaissance du volcanisme indonésien : le Merapi (Centre-Java). Cadre structural, pétrologie-géochimie et implications volcanologiques. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 212 p.
- Barberi F., Davis M.S., Isaia R., Nave R., Ricci T., 2008. Volcanic risk perception in the Vesuvius population. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 244-258.
- Bardintzeff J.M., 1984. Merapi volcano (Java Indonesia) and Merapi-type nuée ardente. *Bulletin of Volcanology*, 47, 433-446.
- Bardintzeff J.M., 2006. *Volcanologie*. Dunod, Paris, 296 p.
- Bautista C.B., 1996. The Mount Pinatubo disaster and the people of Central Luzon. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Philvolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Baxter P., 2000. Impacts of eruptions on human health. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1035-1044.
- Baxter P., 2011. Volcanoes and Human Health. *Encyclopedia of Environmental Health*, 2011, 672-680.
- Baxter P., Gresham A., 1997. Deaths and injuries in the eruption of Galeras Volcano, Colombia, 14 January 1993. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 325-338.
- Beauducel F., 1998. Structures et comportement mécanique du volcan Merapi (Java) : une approche méthodologique du champ de déformations. Thèse de doctorat, Université Paris 7, IPGP, 260 p.
- Bernard B., 2008. Etude des dépôts d'avalanches de débris volcaniques : analyse sédimentologiques d'exemples naturels et identification des mécanismes de mise en place. Thèse de doctorat, Université Clermont-Ferrand II Blaise Pascal, 293 p.
- Berthommier P.C., 1990. Etude volcanologique du Merapi (Centre Java): Téphrostratigraphie et chronologie - mécanismes éruptifs. Thèse de doctorat, Université Clermont-Ferrand II Blaise Pascal, 115 p.
- Berti M., Genevois R., LaHusen R., Simoni A., Tecca P.R., 2000. Debris flow monitoring in the acquabona watershed on the Dolomites (Italian alps). *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25, 707-715.
- Bird D.K., Gisladdottir G., Dominey-Howes D., 2010. Volcanic risk and tourism in southern Iceland: Implications for hazard, risk and emergency response education and training. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 33-48.
- Bourdier J.L., Pratomo I., Thouret J.C., Boudon G., Vincent P.M., 1997a. Observations, stratigraphy and eruptive processes of the 1990 eruption of Kelut volcano, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79, 181-203.
- Bourdier J.L., Thouret J.C., Pratomo I., Vincent P.M., Boudon G., 1997b. Menaces volcaniques au Kelut (Java, Indonésie) : les enseignements de l'éruption de 1990. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de Paris*, 324, 961-968.
- Brantley S.R., Waitt R.B., 1988. Interrelations among pyroclastic surge, pyroclastic flow, and lahars in Smith Creek valley during first minutes of 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, USA. *Bulletin of Volcanology*, 50, 304-326.
- Bruneau M., 2007. *L'Asie d'entre Inde et Chine*, Belin, Paris, 318 p.

- Brunet R., Ferras R., Théry H., 2005. Les mots de la géographie, dictionnaire critique. La Documentation Française, Paris. 518 p.
- Cadet B., 2006. Percevoir et évaluer les risques, les apports de la psychologie en matière de traitement des informations. In: Kouabenan D.R., Cadet B., Hermand D., Muñoz-Sastre M.T. (dir) Psychologie du risque. Ouvertures Psychologiques, De Boek & Larcier, Bruxelles, 35-60.
- Cakir R., Walsh T.J., 2012. Loss estimation pilot project for lahar hazards from Mount Rainier, Washington. Washington Division Geology and Earth Resources, Information Circular 113, 17 p.
- Camus G., Gourgaud A., Mossand-Berthommier P.C., Vincent P.M., 2000. Merapi (Central Java, Indonesia): An outline of the structural and magmatological evolution, with a special emphasis to the major pyroclastic events. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 139-163.
- Cannon T., 1994. Vulnerability analysis and the explanation of 'natural' disasters. In: Varley A. (dir.) Disasters, development and environment. Wiley, Chichester, 13-30.
- Capra L., Borselli L., Varley N., Gavilanes-Ruiz J.C., Norini G., Sarocchi D., Caballero L., Cortés A., 2010. Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: Surface hydro-repellency as initiation process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 105-117.
- Capra L., Macías J.L., Scott K.M., Abrams M., Garduño-Monroy V.H., 2002. Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico – behavior, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 81-110.
- Capra L., Poblete M.A., Alvarado R., 2004. The 1997 and 2001 lahars of Popocatepetl volcano (Central Mexico): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131, 351-369.
- Carey S., Bursik M., 2000. Volcanic Plumes. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, 527-544.
- Carlino S., Somma R., Mayberry G.C., 2008. Volcanic risk perception of young people in the urban areas of Vesuvius: Comparisons with other volcanic areas and implications for emergency management. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 229-243.
- Carrasco-Núñez G. et Rose W.I., 1995. Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), México, 8.5–9.0 ka. management. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69, 197-215.
- Carrivick J.L., Manville V., Graettinger A., Cronin S.J., 2010. Coupled fluid dynamics-sediment transport modelling of a Crater Lake break-out lahar: Mt. Ruapehu, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 338, 399-413.
- Cashman K., Sturtevant B., Papale P., Navon O., 2000. Magmatic fragmentation. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, 421-430.
- Charbonnier S.J., Gertisser R., 2008. Field observations and surface characteristics of pristine block-and-ash flow deposits from the 2006 eruption of Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 177, 4, p. 971-982.
- Chardon A.C., 1994. Etude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manizales (Colombie) aux risques naturels. *Revue de Géographie alpine*, 82, 97-111.

- Chardon A.C., Thouret J.C., 1994. Cartographie de la vulnérabilité d'une population citadine face aux risques naturels : le cas de Manizales. *Mappemonde*, 4, 37-40.
- Chester D.K., Degg M., Duncan A.M., Guest J.E., 2000. The increasing exposure of cities to the effects of volcanic eruptions: a global survey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 2, 89-103.
- Coédès G., 1964. Les états hindouisés d'Indochine et d'Indonésie. E. de Boccard, 494 p.
- Cola R.M., 1996. Responses of Pampanga households to lahar warnings: Lessons from two villages in the Pasig-Potrero River watershed. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.) *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, USGS/Phivolcs, 1120 p.
- Cortés A., Macías J.L., Capra L., Garduño-Monroy V.H., 2009. Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México: The 3600 yr BP La Lumbre-Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 52-66.
- Cronin S.J., Neall N.E., Lecointre J.A., Palmer A.S., 1997. Changes in Whangaehu river lahar characteristics during the 1995 eruption sequence, Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 76, 47-61.
- Cronin S.J., Gaylord D.R., Charley D., Alloway B.V., Wallez S., Esau J.W., 2004a. Participatory methods of incorporating scientific with traditional knowledge for volcanic hazard management on Ambae Island, Vanuatu. *Bulletin of Volcanology*, 66, 652-668.
- Cronin S.J., Petterson M.G., Taylor P.W., Biliki R., 2004b. Maximising Multi-Stakeholder Participation in Government and Community Volcanic Hazard Management Programs; A Case Study from Savo, Solomon Islands. *Natural Hazards*, 33, 105-136.
- D'Ambrosio D., Di Gregorio S., Iovine G., Lupiano V., Merenda L., Rongo R., Spataro W., 2002. Simulating the Curti-Sarno debris flow through cellular automata: the model SCIDDICA (release S2). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27, 1577-1585.
- D'Ambrosio D., Iovine J., Spataro W., Miyamoto H., 2007. A macroscopic collisional model for debris-flows simulation. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1417-1436.
- D'Ambrosio D., Di Gregorio S., Iovine G., Lupiano V., Rongo R., Spataro W., 2003. First simulations of the Sarno debris flows through Cellular Automata modelling. *Geomorphology*, 54, 91-117.
- D'Ercole R., 1996. La catastrophe et son impact à moyen terme : l'exemple de Popayan (Colombie), dix ans après le séisme de 1983. *Cahier des Sciences humaines*, 32, 445-470.
- D'Ercole R., 1998. Approches de la vulnérabilité et perspectives pour une meilleure logique de repartition des risques. *Pangea* 29-30, 20-28.
- D'Ercole R., Metzger P., 2009. La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeographie : European Journal of Geography*. URL : <http://cybergeographie.revues.org/22022>.
- D'Ercole R., Rançon J.P., 1994. La future éruption de la Montagne Pelée : risques et représentations. *Mappemonde*, 4, 31-36.
- D'Ercole R., Thouret J.C., Dollfus O., Asté J.P., 1994. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine*, 82, 87-96.
- Damby D.E., Horwell C.J., Baxter P.J., Delmelle P., Donaldson K., Dunster C., Fubini B., Murphy F.A., Nattrass C., Sweeney S., Tetley T.D., Tomatis M., sous presse. The respiratory health hazard of tephra from the

- 2010 centennial eruption of Merapi with implications for occupational mining of deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Darnell A.R., Barclay J., Herd R.A., Phillips J.C., Lovett A.A., Cole P., 2012. Geographical information system approaches for hazard mapping of dilute lahars on Montserrat, West Indies. *Bulletin of Volcanology*, 74, 1337-1353.
- Dauphiné A., 2001. Risques et catastrophes. Observer - spatialiser - comprendre - gérer. Armand Colin, Paris, 288 p.
- Dauphiné A., 2004. Réflexions préliminaires sur les vulnérabilités analytiques et synthétiques. In: Veyret Y., Garry G., Meschinet de Richemond N. (dir.) *Risques naturels et aménagement en Europe*. A. Colin, Paris, 254 p.
- Dauphiné A., Provolito D., 2007. La résilience : un concept pour la gestion des risques. *Annales de Géographie*, 654, 115-125.
- Davidson J., De Silva S., 2000. Composite volcanoes. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 663-681.
- Davila N., Capra L., Gavilanes-Ruiz J.C., Varley N., Norini G., Gómez Vazquez A., 2007. Recent lahars at Volcán de Colima (Mexico): Drainage variation and spectral classification. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165, 127-141.
- Davis I., 1978. *Shelter after disaster*. Oxford Polytechnic Press, Oxford, 127 p.
- Davis I., 1987. Safe shelter within unsafe cities. *Open House International* 12, 5-15.
- Davis I., Haghebeart B., Peppiatt D., 2004. Social vulnerability and capacity analysis. Discussion paper and workshop report, ProVention Consortium, Geneva.
- De Bélizal E., 2009. Les dépôts d'origine volcanique sur l'île de Java (Indonésie) : ressource, exploitation, impacts. Mémoire de Master 2, inédit, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 86 p.
- De Bélizal E., Lavigne F., Grancher D., 2011. Quand l'aléa devient la ressource : l'activité d'extraction des matériaux volcaniques autour du volcan Merapi (Indonésie) dans la compréhension des risques locaux. *Cybergeo : European Journal of Geography*, article 525, URL : <http://cybergeo.revues.org/23555>.
- De Bélizal E., Lavigne F., Gaillard J.C., Grancher D., Pratomo I., Komorowski J.C., 2012. The 2007 eruption of Kelut volcano (East Java, Indonesia): Phenomenology, crisis management and social response. *Geomorphology*, 136, 165-175.
- De Koninck R., 2005. *L'Asie du Sud-Est*. Armand Colin, Paris, 362 p.
- De La Cruz-Reyna S., Meli R.P., Quaas R.W., 2000. Volcanic crises management. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1199-1214.
- Dehn J., McNutt S.R., 2000. Volcanic materials in commerce and industry. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1271-1282.
- Del Marmol M.A., 1989. The petrology and geochemistry of Merapi volcano, Central Java, Indonesia. Thèse de doctorat, The John Hopkins University, Baltimore, Maryland, 384 p.
- Djumarma A., Bronto S., Bahar I., Suparban F.X., Sukhyar R., Newhall C.G., Holcomb R.T., Banks N.G., Torley R., Lockwood J.P., Tilling R.I., Rubin M., del Marmol M.A., 1986. Did Merapi Volcano (Central Java) erupt

- catastrophically in 1006 A.D.? International Volcanological Congress, IAVCEI, Auckland, Nouvelle-Zélande, 236 p.
- Dominey-Howes D., Minos-minopoulos D., 2004. Perceptions of hazard and risk on Santorini. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 137, 285-310.
- Donovan K., 2010. Doing social volcanology: exploring volcanic culture in Indonesia, *Area*, 42, 117-126.
- Dove M.R., 2007. Perceptions of local knowledge and adaptation on Mt. Merapi, Central Java. In: Ellen R.F., Puri R. (dir.) *Traditional Ecological Knowledge and crisis management in Island Southeast Asia*. Berghahn Books, New York/Oxford, 288 p.
- Dove M.R., 2008. Perception of volcanic eruption as agent of change on Merapi volcano, Central Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 329-337.
- Dove M.R., 2010. The panoptic gaze in a non-western setting: self-surveillance on Merapi volcano, Central Java. *Religion*, 40, 121-127.
- Doyle E.E., Cronin S.J., Cole S.E., Thouret J.C., 2010. The coalescence and organization of lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 72, 961-970.
- Drabek, T., 1999. Understanding disaster warning responses. *The Social Science Journal*, 36, 515-523.
- Driedger C.L., Scott W.E., 2008. Mount Rainier - Living Safely With a Volcano in Your Backyard. U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2008-3062, 4 p.
- Duncan A.M., Chester D.K., Guest J.E., 1981. Mount Etna Volcano: Environmental impact and problem of volcanic prediction. *Geographical Journal*, 147, 164-179.
- Escher B.G., 1933. On the character of the Merapi eruption in Central Java. *Leidsche Geologische Mededelingen*, 6, 51-58.
- Fisher R.V., 1995. Decoupling of pyroclastic currents: hazards assessments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66, 257-263.
- Fisher R.V., Schmincke H.U., 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer Verlag, Berlin, 472 p.
- Folk R.L., Ward W.C., 1957. Brazos River bar : a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary petrology*, 27, 3-26.
- Franck M., 2010. Diffusion spatiale de l'urbanisation et de l'industrialisation et formation d'une région urbaine : le cas de Surabaya, en Indonésie. *Annales de Géographies*, 671-672, 69-92.
- Fridleifsson I.B., Stefánsson V., 1998. Geothermal visions. 5th Geothermal Conference of Geothermische Vereinigung eV, Straubing, Allemagne. Tagungsband 5, Geothermische Fachtagung, 578-587.
- Gaillard J.C., 2007. De l'origine des catastrophes : phénomènes extrêmes ou âpreté du quotidien ? *Natural Science Society*, 15, 44-47.
- Gaillard J.C., 2008. Alternative paradigms of volcanic risk perception: the case of Mt Pinatubo in the Philippines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 315-328.
- Gaillard J.C., Cadag J.R.D., 2009. From marginality to further marginalization : experiences from the victims of the July 2000 Payatas trashslide in the Philippines. *Journal of Disasters Risk Studies* 2, 197-214.

- Gaillard J.C., D'Ercole R., Leone F., 2001. Cartography of population vulnerability to volcanic hazards and lahars of Mount Pinatubo (Philippines): a case study in Pasig-Potrero River basin (province of Pampanga). *Géomorphologie : reliefs, processus, environnement*, 3, 209-222.
- Gaillard J.C., Maceda E.A., Stasiak E., Le Berre I., Espaldon M.V.O., 2009. Sustainable livelihoods and people's vulnerability in the face of coastal hazards. *Journal of Coastal Conservation*, 13, 119-129.
- Gaillard J.C., Pangilinan M.R.M., Cadag J.R., Le Masson V., 2008. Living with increasing floods: insights from a rural Philippine community. *Disaster prevention and management*, 17, 383-395.
- Gaillard J.C., Wisner B., Benouar D., Cannon T., Créton-Cazanave L., Dekens J., Fordham M., Gilbert C., Hewitt K., Kelman I., Morin J., N'Diaye A., O'Keefe P., Oliver-Smith A., Quesada C., Revet S., Sudmeier-Rieux K., Texier P., Vallette C., 2010. Alternatives pour une réduction durable des risques de catastrophe. *Human Geography*, 3, 66-88.
- Gavilanes-Ruiz J.C., Cuevas-Muñiz A., Varley N., Gwynne G., Stevenson J., Saucedo-Girón R., Pérez-Pérez A., Aboukhalil M., Cortés-Cortés A., 2009. Exploring the factors that influence the perception of risk: The case of Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 238-252.
- Geophysical Mass Flow Group (GMFG), 2007. Titan 2D User Guide, release 2,0,0, 2007.07.09. University at Buffalo, NY, USA, 58 p.
- Gertisser R., Charbonnier S.J., Keller J., Quidelleur X., 2012. The geological evolution of Merapi volcano, Central Java, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 74, 1213-1233.
- Goldblum C., Franck M., 2007. Les villes aux marges de la métropolisation en Asie du Sud-Est. *Espace géographique*, 36, 229-236.
- Gomez C., Lavigne F., Lespinasse N., Hadmoko D.S., Wassmer P., 2008. Longitudinal structure of pyroclastic flow deposits, revealed by GPR survey, at Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 439-447.
- Gomez C., Lavigne F., 2010. Automated block detection in lahars through 3-bands spectral analysis of video images. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190, 379-384.
- Gomez C., Janin M., Lavigne F., Gertisser R., Charbonnier S., Lahitte P., Sri Hadmoko D., Fort M., Wassmer P., Degroot V., Murwanto H., 2010. Borobudur, a basin under volcanic influence: 361,000 years BP to present. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 196, 245-264.
- Gregg C.E., Houghton B.F., Johnston D.M., Paton D., Swanson D.A., 2004. The perception of volcanic risk in Kona communities from Mauna Loa and Hualālai volcanoes, Hawai'i. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130, 179-196.
- Grove T.L., 2000. Origin of magmas. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 133-148.
- Hadikusumo D., 1969. Preliminary report on the Mt. Merapi volcanic eruption, Indonesia, 7 January 1969. Smithsonian Institute Center for Short-lived phenomena, 6 p.
- Hall M.L., Mothes P.A., 2008. Volcanic impediments in the progressive development of pre-Columbian civilizations in the Ecuadorian Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 344-355.
- Harris S.L. 2000. Archaeology and volcanism. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1301-1314.

- Hartmann M.A., 1935. Die Ausbrüche des G. Merapi (Mitteljava) bis zum Jahre 1883. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 75, 127-162.
- Hayes S., Montgomery D.R., Newhall C.G., 2002. Fluvial sediment transport and deposition following the 1991 eruption of Mount Pinatubo. *Geomorphology*, 45, 211-224.
- Heggie T., 2009. Geotourism and volcanoes: Health hazards facing tourists at volcanic and geothermal destinations. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 7, 257-261.
- Heggie T., 2010. Volcanoes and travel medicine. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 8, 199-200.
- Heijmans A., 2004. From vulnerability to empowerment. In: Bankoff G., Frerks G., Hilhorst D. (dir.) *Mapping vulnerability: disasters, development and people*. Earthscan, Londres, 115-127.
- Hewitt K., 1983. The Idea of Calamity in a Technocratic Age. In: Hewitt K. (dir.) *Interpretations of Calamity: From the Viewpoint of Human Ecology*. Boston, MA, Londres and Sydney: Allen and Unwin Inc, 3-32.
- Hoblitt R. P., Wilder, J. S., Driedger C. L., Scott K. M., Pringle P. T., Vallance, J. W., 1998. Volcano hazards from Mount Rainier, Washington, revised 1998. USGS Open-File Report: 98-428. 11 p.
- Hodge D., Sharp V., Marts M., 1979. Contemporary responses to volcanism : case studies from the Cascades and Hawaii. In Sheets J.D., D.K. Grayson (dir.) *Volcanic activity and human ecology*. Academic Press, New York, 644 p.
- Horny V., 2012. La gestion du risque de lahar à Yogyakarta suite à l'éruption du volcan Merapi de 2010. Mémoire de Master 1, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 69 p. et film de 25 min.
- Hubbard B.E., Sheridan M.F., Carrasco-Núñez G., Díaz-Castellón R., Rodríguez S.R., 2007. Comparative lahar hazard mapping at Volcan Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 digital topographic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160, 99-124.
- Huggel C., Schneider D., Julio Miranda P., Delgado Granados H., Käab A., 2008. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: A case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170, 99-110.
- Iverson R.M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35, 245-296.
- Iverson R.M., Schilling S.P., Vallance J.W., 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 972-984.
- Jaloux H., 2012. La pierre ponce, étude d'une ressource volcanique. Mémoire de Master 1, inédit, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 78 p.
- Janda R.J., Daag A.S., Delos Reyes P.J., Newhall C.G., Pierson T.C., Punongbayan R.S., Rodolfo K.S., Solidum R.U., Umbal J.V., 1996. Assessment and response to lahar hazard around Mount Pinatubo, 1991 to 1993. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.) *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1120 p.
- Jitousono T., Shimokawa E., Tsuchiya S., Haryanto, Djamal H., 1995. Debris flows following the 1984 eruption with pyroclastic in Merapi volcano, Indonesia. In: *Proceedings Workshop on Erosion Control through Volcanic Hydrological Approach (WECVHA)*, Sabo Technical Center, Yogyakarta, January, 131-149.

- Joyce K.E., Samsonov S., Manville V., Jongens R., Graettinger A., Cronin S.J., 2009. Remote sensing data types and techniques for lahar path detection: A case study at Mt Ruapehu, New Zealand. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1778-1786.
- Keigler R., Thouret J.C., Hodgson K.A., Neall V.E., Lecointre J.A., Procter J.N., Cronin S.J., 2011. The Whangaehu Formation: Debris-avalanche and lahar deposits from ancestral Ruapehu volcano, New Zealand. *Geomorphology*, 133, 57-79.
- Kelman I., Mather T., 2008. Living with volcanoes: the sustainable livelihoods approach for volcano-related opportunities. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 189-198.
- Kemmerling G.L.L., 1931. Beshouwingen over de hernieuwde werking van den Merapi der Vorstenlanden van December 1930. *Tijd. Kon. Ned. Aarddr. Genoot.*, 48, 712-743.
- Komorowski J.C., Jenkins S., Baxter P.J., Picquout A., Lavigne F., Charbonnier S., Gertisser R., Preece K., Cholik N., Budi-Santoso A., Surono, sous presse. Paroxysmal dome explosions during the Merapi 2010 eruption: Processes and facies relationships of associated high-energy pyroclastic density currents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Kouabenan D.R., 2006. Des facteurs structurants aux biais ou illusions dans la perception des risques. In: Kouabenan D.R., Cadet B., Hermand D., Muñoz-Sastre M.T. (dir) *Psychologie du risque. Ouvertures Psychologiques*, De Boek & Larcier, Bruxelles, 125-145.
- Kreimer A., Munasinghe M., 1991. Managing environmental degradation and natural disasters : an overview. In: Kreimer A., Munasinghe M. (dir.) *Managing natural disasters and environment*. World Bank, Washington, 3-6.
- Künzler M., Huggel C., Ramírez J.M., 2012. A risk analysis for floods and lahars: case study in the Cordillera Central of Colombia. *Natural Hazards*, 64, 767-796.
- Lahousse P., Salvador P.G., 1998. Briançon, 24 juillet 1995: autopsy et enseignements d'une catastrophe naturelle. *Mappemonde*, 50, 8-12.
- Lahousse P., Salvador P.G., 1999. Eléments de réflexion sur la prévisibilité des crues torrentielles du 24 juillet 1995 dans la vallée de la Guisane (Alpes françaises, Briançonnais). *Revue de Géographie Alpine*, 87, 25-34.
- Laksono P. M., 1988. Perception of volcanic hazards : villagers versus government officials in Central-Java. In: Dove M.R. (dir.) *The real and imagined role of culture in development : case studies from Indonesia*. University of Hawaii Press, Honolulu, 289 p.
- Lavigne F., Thouret J.C., 1994. Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie). *Revue de géographie alpine*, 82, 151-166.
- Lavigne F., 1998. Les lahars du volcan Merapi, Java Central, Indonésie : déclenchement, budget sédimentaire, dynamique et zonage des risques associés. Thèse de doctorat, Université Clermont-Ferrand II Blaise Pascal, 603 p.
- Lavigne F., 1999. Lahar hazard micro-zonation and risk assessment in Yogyakarta city, Indonesia. In: Thouret J.C. (dir.) *Urban hazards and risks: consequences of large eruptions and earthquakes*, *GeoJournal*, 49, 173-183.
- Lavigne F., Thouret J.-C., Voight B., Suwa H., Sumaryono A., 2000a. Lahars at Merapi Volcano: an overview. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 423-456.

- Lavigne F., Thouret J.-C., Voight B., Young K., Lahusen R., Marso J., Suwa H., Sumaryono A., Sayudi D.S., Dejean M., 2000b. Instrumental lahar monitoring at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 457-478.
- Lavigne F., Thouret J.C., 2002. Sediment transportation and deposition by rain-triggered lahars at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Geomorphology*, 49, 45-69.
- Lavigne F., Tirel A., Le Floch D., Veyrat-Charvillon S., 2003. An assessment of lahar dynamics and sediment load using video-camera recording at Semeru volcano, Indonesia. In: Rickenmann D., Chen C.L. (dir.), *Debris-Flow Hazards Mitigation--Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of the Third International Conference, Davos, Suisse*. Rotterdam, MillPress Science Publishers, 871-882.
- Lavigne F., Suwa H., 2004. Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 61, 41-58.
- Lavigne F., Hadisantono R., Surmayadi M., Surono, Flohic F., Geyer F., 2005. The November 2002 eruption of the Papandayan volcano (Indonesia): direct and induced hazards, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Vol.* 140, 151-165.
- Lavigne F., De Coster B., Juvin N., Flohic F., Gaillard J.-C., Texier P., Morin J., Sartohadi J., 2008. People's behaviour in the face of volcanic hazards : perspectives from Javanese communities, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 273-287.
- Laws E., 2011. Volcano and geothermal tourism, sustainable geo-resources for leisure and recreation. *Tourism Management*, 32, 1489-1490.
- Leonard G.S., Johnston D.M., Paton D., Christianson A., Becker J., Keys H., 2008. Developing effective warning systems: Ongoing research at Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 199-215.
- Leone F., 2008. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes "naturelles". APARIS, Paris, 334 p.
- Leone F., Gaillard J.C., 1999. Analysis of the institutional and social responses to the eruptions and the lahars of Mount Pinatubo volcano from 1991 to 1998 (Central Luzon, Philippines). In: Thouret J.C. (dir.) *Urban hazards and risks: consequences of large eruptions and earthquakes*, *GeoJournal*, 49, 223-238.
- Leone F., Vinet F., 2006. La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. In: Leone F. et Vinet F. (dir.) *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles, Analyse géographique*. Collection « Géorisques », Publications de l'Université Paul Valéry – Montpellier III, 9-21.
- Leone F., Meschin de Richemond N., Vinet F., 2010. Aléas naturels et gestion des risques. "Licence", P.U.F., 284 p.
- Leone F., Deymier J., inédit. Système d'Information Géographique et Indicateurs de Risque naturel dans le bassin caribéen et les Petites Antilles, le projet Caribsats. Présentation powerpoint, inédite.
- Lombard D., 1990. Le carrefour javanais, essai d'histoire globale. EHESS, Paris, 3 tomes, 1021 p.
- Lube G., Cronin S.J., 2008. The avulsion of pyroclastic flows from channels – a cautionary tale from the 14 June 2006 eruption of Gunung Merapi, Indonesia. *Asian International Symposium on Modelling of Volcanic Eruption for Volcanic Hazard Assessment*, Bandung, Indonesia, 67-71.

- Major J.J., Newhall, C.G., 1989. Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bulletin of Volcanology*, 52, 1-27.
- Major J.J., Janda R.J., Daag, 1996. Watershed disturbance and lahars on the East side of Mount Pinatubo during the mid-June 1991 eruptions. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Major J.J., Schilling S.P., Pullinger, C.R., 2003. Volcanic debris flows in developing countries - the extreme need for public education and awareness of debris-flow hazards. In: Rickenmann D., Chen C.L. (dir.), *Debris-Flow Hazards Mitigation--Mechanics, Prediction, and Assessment*, Proceedings of the Third International Conference, Davos, Suisse. Rotterdam, MillPress Science Publishers, 1185-1196.
- Maltby E., 1986. *Waterlogged world*. Earthscan, International Institute for Environment and Development, Londres, 200 p.
- Marchi L., Arattano M., Deganutti A.M., 2002. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46, 1-17.
- Marcial S., Melosantos A.A., Hadley K.C., LaHusen R.G., Marso J.N., 1996. Instrumental lahar monitoring at Mount Pinatubo. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Martinez M.M.L., Arboleda R.A., Reyes P.J.D., Gabinete E., Dolan M.T., 1996. Observations of 1992 lahars along the Sacobia-Bamban River system. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Mas-Pla J., Montaner J., Sola J., 1999. Groundwater resources and quality variations caused by gravel mining in coastal streams. *Journal of Hydrology*, 2616, 197-213.
- McEwen A., Malin M.C., 1989. Dynamics of Mount St Helens' 1980 pyroclastic flows, rockslide-avalanche, lahars and blast. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37, 205-231.
- Mei E.T.W., Lavigne F., 2011. Evacuation management during the 2010 eruptive crisis of Merapi volcano, Indonesia. *Proceeding: TIEMS Annual Conference in Bucharest, Romania 7th - 10th June 2011*.
- Mei E.T.W., Lavigne F., 2012. Influence of the institutional and socio-economic context for responding to disasters: case study of the 1994 and 2006 eruptions of the Merapi Volcano, Indonesia. *Geological Society, Londres, Special Publications*, 361, 171-186.
- Mei E.T.W., Lavigne F., Picquout A., De Bélizal E., Brunstein D., Grancher D., Sartohadi J., Cholikh N., Vidal C., sous presse. Lesson learned from the 2010 Merapi Volcano Crisis: an Evacuation Chronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Mercado R.A., Lacsamana J.B.T., Pineda G.L., 1996. Socioeconomic impacts of the Mount Pinatubo eruption. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Miyabuchi Y., 1999. Deposits associated with the 1990–1995 eruption of Unzen volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 89, 139-158.
- Morin J., Lavigne F., 2008. Institutional and social responses to hazards related to Karthala volcano, Comoros. Part II - Deep-seated root causes of Comorian vulnerabilities. *SHIMA The International Journal of Research into Island Cultures*, 3, 54-71.

- Muñoz-Salinas E., Castillo-Rodríguez M., Manea V., Manea M., Palacios P., 2009. Lahar flow simulations using LAHARZ program: Application for the Popocatépetl volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182, 13-22.
- Muñoz-Salinas E., Manea V.C., Palacios D., Castillo-Rodríguez M., 2007. Estimation of lahar flow velocity on Popocatépetl volcano (Mexico). *Geomorphology*, 92, 91-99.
- Nakada S., 2000. Hazards from pyroclastic flows and surges. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 945-955.
- Neall V.E., 1976. Lahars as major geological hazards. *Bulletin of the International Association of Engineering Geologists*, 14, 233-240.
- Neumann van Padang M., 1933. De uitbarsting van den Merapi (Midden Java) in de jaren 1930-1931. *Vulkanol. en seismol. med.*, 12, 1-116.
- Neumann van Padang M., 1951. Indonesia, part. I, Catalogue of the active volcanoes of the world including solfatara fields. International Volcanological Association, Naples. (Partie 6.3-25 : Merapi).
- Newhall C.G., Bronto S., Alloway B., Banks N.G., Bahar I., Del Marmol M.A., Hadisantono R.D., Holcomb R.T., McGheekin J., Miksic J.N., Rubin M., Sayudi S.D., Sukyar R., Andreastuti S., Tilling R.I., Torley R., Trimble D., Wirakusumah A.D., 2000. 10,000 Years of explosive eruptions of Merapi Volcano, Central Java : archaeological and modern implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 9-50.
- Okano K., Suwa H., Kanno T., 2012. Characterization of debris flows by rainstorm condition at a torrent on the Mount Yakedake volcano, Japan. *Geomorphology*, 136, 88-94.
- O'Keefe P., Westgate K., Wisner B., 1976. Taking the Naturalness Out of Natural Disasters. *Nature*, 260, 566-567.
- Oliver-Smith A., 1991. Successes and failures in post-disaster resettlement. *Disasters* 15, 12-23.
- Oramas Dorta D., Toyos G., Oppenheimer C., Pareschi M.T., Sulpizio R., Zanchetta G., 2007. Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ. *Natural Hazards*, 40, 381-396.
- Paguican E.M.R., Lagmay A.M.F., Rodolfo K.S., Rodolfo R.S., Tengonciang A.M.P., Lapus M.R., Baliatan E.G., Obille Jr E.C., 2009. Extreme rainfall-induced lahars and dike breaching, 30 November 2006, Mayon Volcano, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 71, 845-857.
- Pain M., 1998. Un modèle de l'espace indonésien ? Ruptures intérieures et espaces transfrontaliers. *Hérodote*, 88, 141-160.
- Pallister J.S., Schneider D.J., Griswold J.P., Keeler R.H., Burton W.C., Noyles C., Newhall C.G., Ratdomopurbo A., sous presse. Merapi 2010 eruption—Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Petit F., Poinart D., Bravard J.-P., 1995. Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France ("canal de Miribel"). *Catena*, 26, 209-226.
- Pierson T.C., Scott K.M., 1985. Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow: *Water Resources Research*, 21, 1511-1524.
- Pierson T.C., Costa J.E., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows: *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12.

- Pierson T.C., Janda R.J., Thouret J.C., Borrero C.A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17-66.
- Pierson, T.C., 1995. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flows at snow-clad volcanoes: constraints for debris-flow models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66, 283-294.
- Pierson T.C., Daag A.S., Delos Reyes P.J., Regalado M.T.M., Solidum R.U., Tubianosa B.S., 1996. Flow and deposition of post-eruption hot lahars on the east side of Mount Pinatubo, July-October 1991. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Pierson T.C., 2005. Hyperconcentrated flow - transitionnal process between water flow and debris flow. In: Jakob M., Hungr O. (dir) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Praxis Publishing, Chichester, Royaume-Uni, 159-202.
- Pigeon P., 2002. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*, 111, 452-470.
- Pigeon P., 2010. Catastrophes dites naturelles, risques et développement durable : Utilisations géographiques de la courbe de Farmer. *Vertigo*, 10, consulté en ligne. URL : <http://vertigo.revues.org/9491>.
- Ping C.L., 2000. Volcanic soils. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1259-1270.
- Prasetyo E.D., 1998. Le banian blanc. Babad Abas, Jakarta, 247 p.
- Pratomo I., 1992. Étude de l'éruption de 1990 du volcan Kelut (Java-Est, Indonésie) : son apport à l'interprétation de l'activité historique du volcan. Thèse de doctorat, Université Clermont-Ferrand II Blaise Pascal, 95 p.
- Prayoga G., 2008. Studi geologi pengembangan wilayah daerah Klungkung Bagian Selatan, Kabupaten Klungkung, Provinsi Bali. Tugas akhir tipe skripsi, Universitas Gadjah Mada, Fakultas Teknik jurusan Teknik Geologi, 101 p.
- Priyo Hutomo A., 1997. Potensi sumberdaya material bahan bangunan di sungai Boyong kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Skripsi - Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Universitas Gadjah Mada, Fakultas Geografi, Yogyakarta, p. 3-119.
- Procter J.N., Cronin S.J., Fuller I.C., Sheridan M., Neall V.E., Keys H., 2010. Lahar hazard assessment using Titan2D for an alluvial fan with rapidly changing geomorphology: Whangaehu River, Mt. Ruapehu. *Geomorphology*, 116, 162-174.
- Procter J.N., Cronin S.J., Sheridan M., 2012. Evaluation of Titan2D modelling forecasts for the 2007 Crater Lake break-out lahar, Mt. Ruapehu, New Zealand. *Geomorphology*, 136, 95-105.
- Purwanto, 2007. Kajian kerusakan lingkungan lereng selatan gunungapi Merapi akibat penambangan bahan galian golongan C di kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Program studi Magister Pengelolaan Lingkungan, jurusan Antar Bidang, Tesis Sekolah Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 90 p.
- Quarantelli E.L., 1984. People's reactions to emergency warning. Disaster Research Center, University of Delaware, 12 p.

- Quarantelli E.L., 2001. The sociology of panic. In: Smelser N.J., Baltes P.B. (dir.) *International Encyclopedia of the social and behavioural sciences*. Pergamon Press, New York, 11020-11023.
- Reghezza M., 2006a. La vulnérabilité : un concept problématique. In: Leone F. et Vinnet F. (dir.) *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles, Analyse géographique*. Collection « Géorisques », Publications de l'Université Paul Valéry – Montpellier III, 35-39.
- Reghezza M., 2006b. *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale*. Thèse de doctorat, Université Paris X Nanterre, 382 p.
- Robertson R.E.A., 1995. An assessment of the risk from future eruptions of the Soufriere volcano of St. Vincent, West Indies. *Natural Hazards*, 11, 163-191.
- Rodolfo K.S., 2000. The hazard from lahars and jökulhaups. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 973-995.
- Rodolfo K.S., Arguden A.T., Solidum R.U., Umbal J.V., 1989. Anatomy and behaviour of a post-eruptive rain lahar triggered by a typhoon on Mayon volcano, Philippines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 40, 55-66.
- Rolandi G., 2010. Volcanic hazard at Vesuvius: An analysis for the revision of the current emergency plan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 347-362.
- Sanderson, D. 2000. Cities, disasters and livelihoods. *Environment and Urban*, 12, 93-102.
- Santi P.M., Hewitt K., VanDine D.F., Barillas Cruz E., 2011. Debris-flow impact, vulnerability and response. *Natural Hazards*, 56, 371-402.
- Saucedo R., Macías J.L., Sarocchi D., Bursik M., Rupp B., 2008. The rain-triggered Atenuque volcaniclastic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 173, 69-83.
- Sayudi D.S., Sulistiyon Y., 1994. Variation in the chemical composition of volcanic gases of Merapi volcano, Central Java, Indonesia. Technical Report, The 5th Field Workshop on Volcanic Gases in Indonesian Volcanoes, Volcanological Survey of Indonesia, Bandung, 65-77.
- Schilling, S.P., 1998. LAHARZ: GIS Programs for Automated Mapping of Lahar-inundation Hazard Zones. USGS Open-File Report 98-638, 80 p.
- Schmidt K.H., 1934. Die Schuttströme am Merapi auf Java nach dem Ausbruch von 1930 (Flows at Merapi, Java, after the 1930 eruption). *De Ingenieur in Nederland Indie*, 7-8-9, Batavia, 69 p.
- Schwarzkopf L.M., Schmincke H.U. et Cronin S.J., 2005. A conceptual model for block-and-ash flow basal avalanche transport and deposition based on deposits architecture of 1998 and 1994 Merapi flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 117-134.
- Scoones I., 1998. Sustainable rural livelihoods: a framework for analysis. IDS working paper 72. Institute of Development Studies, Brighton.
- Scoones I., 2009. Livelihoods perspectives and rural development. *Journal of Peasant Studies* 36, 171-196.
- Scott K.M., 1988. Origin, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system. USGS Professional Paper 1447-A, 75 p.
- Scott K.M., Vallance J.W., 1995. Debris flow, debris avalanche, and flood hazards at and downstream from Mount Rainier, Washington. USGS Hydrologic Investigations Atlas HA-729, 9 p.

- Scott K.M., Vallance J.W., Pringle P.P., 1995. Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington. USGS Professional Paper 1547, 56 p.
- Scott K.M., Janda R.J., de la Cruz E.G., Gabet E., Eto I., Isada M., Sexon M., Hadley K.C., 1996. Channel and sedimentation responses to large volumes of 1991 volcanic deposits on the east flank of Mount Pinatubo. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Sevin O., 2001. Migrations, colonisation agricole et terres neuves en Indonésie. Bordeaux-Pessac : CRET, collection « Îles et Archipels », n° 28, 2 tomes, 930 p.
- Shimokawa E., Jitousono T., Tsuchiya S., Djamal H., Haryanto, 1995. Sediment yield from the 1984 pyroclastic flow deposits covered hillslopes in Merapi volcano, Indonesia. In: Proc. Workshop on Erosion Control through Volcanic Hydrological Approach (WECVHA), Sabo Technical Center, Yogyakarta, 10-11 January, 150-162.
- Sigurdsson H., 2000. Volcanic episodes and rates of volcanism. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 271-279.
- Sigurdsson H., Lopes-Gautier R., 2000. Volcanoes and Tourism. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 1283-1300.
- Siswawidjono S., Suryo I., Yokoyama I., 1995. Magma eruption rates of Merapi volcano, Central Java, Indonesia, during one century (1890-1992). *Bulletin of Volcanology*, 57, 111-116.
- Slovic P., 2000. Perception of risk. In: Slovic P. (dir.) *The Perception of Risk*. Earthscan, Londres, 220-231.
- Slovic P., Fischhoff B., Lichtenstein S., 1981. Perceived risk: psychological factors and social implications. In: Warner F., Slater H.D. (dir.) *The assessment and perception of risk*. The Royal Society, Londres, 17-34.
- Smith G.A., Fritz W.J., 1989. Penrose Conference report: volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17, 376. Penrose Conference report: volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17, 376.
- Smith G.A., Lowe D.R., 1991. Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum. In: Fisher R.V., Smith G.A. (dir.), *Sedimentation in volcanic settings*. SEPM Special Publications, 45, Tulsa, Oklahoma, 60-70.
- Spence R.J.S., Baxter P., Zuccaro G., 2004. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133, 321-343.
- Sri Hadmoko D., Marfai M.A., Widiyanto, Permatasari A.L., Wacano D., 2011. Pemodelan mikrozonasi risiko bahaya lahar akibat erupsi Merapi 2010 di wilayah perkotaan: kasus aliran kali Code, laporan akhir. Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 50 p.
- Sri Sumarti, Suryono, 1994. Chemistry model of Merapi Volcano. Technical Report, The 5th Field Workshop on Volcanic Gases in Indonesian Volcanoes, Volcanological Survey of Indonesia, Bandung, 96-111.
- Sudibyo J., 2002. Menuju pengelolaan kegiatan pertambangan bahan galian golongan C yang berwawasan lingkungan di kawasan Gunung Merapi, kabupaten Magelang. Program studi pembangunan program pascasarjana, Institut Teknologi Bandung. P. ?

- Sudradjat A., Tilling R.I., 1984. Volcanic hazards in Indonesia: the 1982-83 eruption of Galunggung. Episode, 7, 13-19.
- Supangkat D., 1988. The side function of sabo structures for the purpose of land conservation in the area of Mt. Kelud. Mt Kelut project, 15 p.
- Surono, Jousset P., Pallister J., Boichu M., Buongiorno M.F., Budisantoso A., Costa F., Andreastuti S., Prata F., Schneider D., Clarisse L., Humaida H., Sri Sumarti, Bignami C., Griswold J., Carn S., Oppenheimer C., Lavigne F., sous presse. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano - A '100-year' event. Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- Takahashi T., 1994. Prediction of debris-flow hydrograph at the Bebeng River, Merapi volcano. In: Japan-Indonesia Joint Research on Natural Hazards prediction and mitigation. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto, 100-113.
- Tanaka M., 1994. Heavy rainfall and disaster in Indonesia. In: Japan-Indonesia Joint Research on Natural Hazards prediction and mitigation. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto, 114-123.
- Tanarro L.M., Andrés N., Zamorano J.J., Palacios D., Renschler C.S., 2010. Geomorphological evolution of a fluvial channel after primary lahar deposition: Huiloac Gorge, Popocatepetl volcano (Mexico). Geomorphology, 122, 178-190.
- Tayag J.C., Punongbayan R.S., 1994. Volcanic disaster mitigation in the Philippines: experience from Mt. Pinatubo. Disasters, 18, 1-15.
- Tazieff H., 1980. Gunung Mérapî, un volcan à Java. Film CNRS-Images, 54 min.
- Texier P., 2007. Les inondations de février 2007 dans les kampung pauvres de Jakarta, causes, enjeux, déroulement, conséquences. EchoGéo, Sur le vif 2007, mis en ligne le 22 juin 2007, consulté le 10 octobre 2012. URL : <http://echogeo.revues.org/905>.
- Texier P., 2009. Vulnérabilité et réduction des risques liés à l'eau dans les quartiers informels de Jakarta (Indonésie). Réponses sociales, institutionnelles et non institutionnelles. Thèse de doctorat, Université Paris 7 Denis-Diderot, 494 p.
- Texier P., Gaillard J.C., Lavigne F., 2009. Les sociétés d'Asie du Sud-est face aux menaces volcaniques : entre phénomènes extrêmes et contraintes quotidiennes. In: Bertrand D., Rieutort L., Thouret J.C. (dir.) Villes et volcans: relations, représentations, pratiques. Collection Volcaniques, Presses de l'Université de Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 71-95.
- Thornton I.W.B., 2000. The Ecology of volcanoes: recovery and reassembly of living communities. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, 1057-1082.
- Thouret J.C., Salinas R., Murcia A., 1990. Eruption and mass-wasting-induced processes during the late holocene destructive phase of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 41, 203-224.
- Thouret J.C., D'Ercole R., 1996. Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. Cahiers des Sciences humaines, 32(2), 407-422.
- Thouret J.C., Abdurachman K. E., Bourdier J.L., Bronto S., 1998. Origin, characteristics, and behavior of lahars following the 1990 eruption of Kelud volcano, Easter Java (Indonesia). Bulletin of Volcanology, 59, 460-480.

- Thouret J.C., 1999. Volcanic geomorphology, an overview. *Earth-Science Reviews*, 47, 95-131.
- Thouret J.C., Lavigne F., Kelfoun K., Bronto S., 2000. Toward a revised hazard assessment at Merapi Volcano, Central Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 479-502.
- Thouret J.C., 2002. Aléas et risques volcaniques : comprendre pour prévoir et mieux gérer pour durer. *Annales de Géographie*, 111, 503-523.
- Thouret J.C., Lavigne F., Suwa H., Sukatja B., Surono, 2007. Volcanic hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars. *Bulletin of Volcanology*, 70, 221-244.
- Thouret J.C., Gupta A., Lube G., Liew S.C., Cronin S.J., Surono, 2010. The 2006 pyroclastic deposits of Merapi volcano, Java, Indonesia: high-spatial resolution IKONOS image and complementary ground based observations. *Remote sensing of environment*, 114, 1949-1967.
- Torres R., Mougini-Mark P., Self S., Garbeil H., Kallianpur K., Quiambao R., 2004. Monitoring the evolution of the Pasig-Potrero alluvial fan, Pinatubo Volcano, using a decade of remote sensing data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138, 371-392.
- Tuñgol N.M., Regalado M.T.M., 1996. Rainfall, acoustic flow monitor records, and observed lahars of the Sacobia River in 1992. In: Newhall C.G. et Punongbayan R.S. (dir.), *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, Phivolcs/University of Washington Press, 1126 p.
- Twigg J., 2001. Sustainable livelihoods and vulnerability to disasters. Working Paper No 2. Benfield Hazard Research Centre, Londres. 18 p.
- Twigg J., 2004. Disaster risk reduction: mitigation and preparedness in development and emergency programming. Good practice review No 9. Humanitarian Practice Network, Londres. 370 p.
- Ui T., Takarada S., Yoshimoto M., 2000. Debris avalanches. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 617-626.
- Utami, 2008. Measuring social vulnerability in volcanic hazards: The case study of Merapi volcano, Indonesia. Mémoire de Master, Université de Bristol.
- Valentine G.A., Fisher R.V., 2000. Pyroclastic surges and blasts. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 571-580.
- Vallance J.W., 2000. Lahars. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 601-616.
- Vallance J.W., 2005. Volcanic debris flows. In: Jakob M., Hungr O. (dir) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Praxis Publishing, Chichester, Royaume-Uni, 247-274.
- Van Bemmelen R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*, vol. I(A). Government Printing Office, La Haye, 732 p.
- Verstappen H.T., 1992. Volcanic hazards in Colombia and Indonesia: lahars and relative phenomena. In: McCall L., Scott K.M. (dir.), *Geohazards Natural and Man made*, Agid report serie, 15. Chapman et Hall, Londres, 33-42.
- Voight B., 1990. The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44, 349-386.
- Voight B., Constantine E.K., Siswamidjono S., Torley R., 2000. Historical eruptions of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia, 1768–1998. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 69-138.

- Voight B., Davis M.J., 2000. Emplacement temperatures of the November 22, 1994 nuée ardente deposits, Merapi Volcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 371-377.
- Waite R.B., Pierson T.C., MacLeod N.S., Janda R.J., Voigt B., Holcomb R.T., 1983. Eruption-Triggered Avalanche, Flood, and Lahar at Mount St. Helens -- Effects of Winter Snowpack. *Science*, 221, 4618, 1394-1397.
- Waythomas C.F., Pierson T.C., Major J.J., Scott W.E., sous presse. Voluminous ice-rich and water-rich lahars generated during the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Wentworth C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- Williams R., Stinton A.J., Sheridan M.F., 2008. Evaluation of the Titan2D two-phase flow model using an actual event: Case study of the 2005 Vazcún Valley Lahar. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 760-766.
- Wilson C.J.N., Houghton B.F., 2000. Pyroclast transport and desposition. In: Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J. (dir.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 555-570.
- Winchester P., 1992. Power, choice and vulnerability: A case study in disaster management in South India, 1977-1988. James and James Science Publishers, Londres.
- Wirakusumah A.D., Juwana H., Lubis H., 1989. Peta Geologi Gunung Merapi Jawa Tengah. Direktorat Vulkanologi, Bandung.
- Wisner B., Blaikie P., Cannon T., Davis I., 2004. At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters. 2nd edition, Routledge, London, 496 p.
- Wisner B., Luce H.R., 1993. Disaster vulnerability : scale, power and daily life. *GeoJournal*, 30, 127-140.
- Wood N., Soulard C., 2009. Variations in population exposure and sensitivity to lahar hazards from Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188, 367-378.
- Worni R., Huggel C., Stoffel M., Pulgarín B., 2012. Challenges of modelling current very large lahars at Nevadol del Huila Volcano, Colombia. *Bulletin of Volcanology*, 74, 309-324.
- Zen M.T., Hadikusumo D., 1965. The future danger of Mt. Kelut (Eastern Java, Indonesia). *Bulletin Volcanologique*, 38, 275-282.
- Zobin V.M., Plascencia I., Reyes G., Navarro C., 2009. The characteristics of seismic signals produced by lahars and pyroclastic flows: Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 179, 157-167.

RAPPORTS FOURNIS PAR LES COMMUNES

- Desa Argomulyo, 2011. Data penerima hunian sementara/shelter akibat lahar dingin, desa Argomulyo, 1 p.
- Desa Bimomartani, 2011. Daftar kerusakan akibat lahar dingin desa Bimomartani, 1 p.
- Desa Jumoyo, 2011. Data sawah yang terendam banjir lahar dingin Gunung Merapi, desa Jumoyo, 8 p.
- Desa Jumoyo, 2011. Data rumah rusak, desa Jumoyo, 4 p.
- Desa Sindumartani, 2011. Data prasarana yang rusak karena lahar dingin Merapi sampai April 2011, 3 p.
- Desa Sirahan, 2011. Data kurban bencana lahar dingin Merapi, desa Sirahan, kecamatan Salam, kabupaten Magelang, 2011, 42 p.
- Desa Tamanagung, 2011. Proposal posko Prumpung, Tamanagung, 8 p.

RAPPORTS FOURNIS PAR LES ADMINISTRATIONS

- Sigma Tiga, 2007. Laporan akhir, kajian kelayakan kegiatan pertambangan bahan galian golongan C di kecamatan Cepogo kabupaten Boyolali. Pemerintah Kabupaten Boyolali, Kantor Pengendalian Dampak Lingkungan, 189 p.
- Yachiyo Engineering Co. Ltd, 2001. Review Master Plan study on Mt Merapi under Mt Merapi and Mt Semeru volcanic disaster countermeasures project, phase II. Tokyo, Japan, 7 vol.
- Yachiyo Engineering Co. Ltd, 2009. Review Master Plan study on Mt Merapi under Mt Merapi and Mt Semeru volcanic disaster countermeasures project, phase II. Tokyo, Japan, 6 vol.
- Wiswakharman P.T., 2001. Final report - pilot project protection area with community base K. Putih, Srumbung District on Mount Merapi project area (study on the utilization of sabo facilities related with sand mining management in Kali Putih Model Basin, Mount Merapi Project Area) – Model manajemen penambangan pasir di Srumbung area. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah Direktorat Jenderal Sumberdaya Air. Proyek Pengendalian Banjir dan Lahar Gunung Merapi. 164 p.

SITOGRAFIE (vérifiée le 25 octobre 2012)

Archives de l'USGS. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/pumice/>

Archives de Pekerjaan Umum (P.U., Ministère des Travaux Publics indonésien).
<http://pustaka.pu.go.id/new/berita-detail.asp?id=231>

Jalin Merapi, 2012. <http://merapi.combine.or.id>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2012. Cold and warm episodes by season. Changes to the Oceanic Nino Index. Site de la NOAA :
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Liste des figures

Figure 1 - Tectonique et volcanisme indonésien (modifié de De Koninck, 2005).....	20
Figure 2 - Les alignements des volcans javanais et les flancs est du Merapi et du Merbabu	20
Figure 3 – Bassins-versants du Merapi.....	21
Figure 4 - L'île de Java: des volcans et des grandes villes.....	22
Figure 5 - Divisions administratives au Merapi : deux provinces et quatre districts.....	24
Figure 6 - L'édifice volcanique du Merapi vu du sud-est	35
Figure 7 – Les temples javanais.....	37
Figure 8 - Le matériel volcanogénique (modifié de Davidson et Da Silva, 2000)	38
Figure 9 - Aspects géomorphologique de l'édifice du Merapi (cliché E. de Bélizal, mai 2012).....	39
Figure 10 - Contexte structural, dynamique et géographique du volcan Merapi	40
Figure 11 - Fonctionnement et exemple de coulée pyroclastique	42
Figure 12 – Exemples de l'évolution de la « cartes des risques » publiées par le PVMB	46
Figure 13 - Coupe en long d'une coulée de débris en mouvement	50
Figure 14 - Hydrogramme théorique d'un lahar « coulée de débris » et variations temporelles des stades et phases du flux.	52
Figure 15 - La ville d'Armero, ensevelie sous les dépôts de lahar du Nevado del Ruiz	53
Figure 16 – Savon auquel des cendres ponceuses du St Helens ont été incorporée	64
Figure 17 - Exemples de dépôts volcanoclastiques (terrasse de la rivière Lengkong, talus distal du volcan Semeru, Java ; cliché M. Deglaire, août 2008).....	67
Figure 18 - Articles d'ornementation en matériel volcanique dans un atelier d'artisanat de la vallée du Maipo, Chili central. A : la matière première, un bloc de rhyolite (lave acide) ; B : sculpture en rhyolite.	68
Figure 19 - Couverture des images satellites et aériennes.....	78
Figure 20 - Carte des sites d'étude retenus pour caractériser l'impact des lahars sur la morphologie des rivières	80
Figure 21 – Exemples des évidences laissées par le passage des lahars.....	81
Figure 22 - Enregistrement et surveillance vidéo des lahars du Merapi en 2011.....	83
Figure 23 - Exemples de prises de vue pour l'analyse vidéo des lahars.....	84
Figure 24 - Coupes stratigraphiques et échantillons pour l'analyse granulométrique	86
Figure 25 - Communes choisies pour l'enquête de perception par questionnaire et effectifs de répondants par commune	88
Figure 26 - Les questionnaires systématiques réalisées auprès des travailleurs dans les sites d'extraction	101
Figure 27 - Étapes de l'étude des risques à l'échelle locale pour un type d'espace particulier, les sites d'extraction du Merapi.....	105
Figure 28 - Résumé du protocole méthodologique de la thèse	107
Figure 29 - Nombre de lahars par rivière (2010-2012).....	112
Figure 30 - Précipitations cumulées (mm) et nombres de lahars par mois sur l'ensemble du Merapi lors de la saison des pluies 2010-2011 (d'après les relevés pluviométriques du BPPTK, juin 2011) ..	114
Figure 31 - Précipitations (mm) durant 4 saisons des pluies au Merapi	115

Figure 32 - Extension des lahars du Merapi en 2010-2011 – Aperçu.....	116
Figure 33 - Hydrogrammes des trois lahars filmés dans la Gendol (février-mars 2011, Plumbon)....	121
Figure 34 - Prises de vue des lahars de la Gendol filmés à Plumbon.....	122
Figure 35 - Prises de vue du lahar de la Kuning, survenu à Padasan le 4 novembre 2010, 15h	124
Figure 36 - Le lahar de la Code du 29 novembre 2010, +1 min 48 après le passage du front	126
Figure 37 - Écoulement hyperconcentré du 29 novembre 2010 dans la Code à Yogyakarta	127
Figure 38 - Jumoyo et la route Semarang-Yogyakarta en cours de déblaiement	127
Figure 39 – L'endommagement des piles des ponts de Tamanagung après le lahar du 30/032011..	128
Figure 40 - Qu'est-ce qu'un corridor de lahar ?.....	130
Figure 41 - L'élargissement de la vallée Senowo : un exemple de corridor de lahar réactivé sur le talus médial.....	131
Figure 42 - Incision et élargissement dans les dépôts volcanoclastiques de la Putih à Jurangjero...	132
Figure 43 - L'incision par les lahars des dépôts pyroclastiques de 2010	134
Figure 44 - L'élargissement du chenal de la Opak dans les villages de Panggung et Teplok.....	135
Figure 45 - Sédimentation et érosion sur le talus distal (Plumbon, Gendol)	137
Figure 46 - Les marques de la défluviatation de la Putih à Sirahan : nouveau chenal et lit d'origine...	140
Figure 47 - La défluviatation des lahars de la Putih à Sirahan	141
Figure 48 - La défluviatation des lahars de la Gendol à Ngerdi.....	142
Figure 49 - La défluviatation de la Gendol à Ngerdi : un nouveau chenal traverse le village après le passage du lahar (cliché E. de Bélizal, mai 2011).....	143
Figure 50 - Profils comparés de la Putih (A) et de la Batang (B) au niveau de Muntilan.....	143
Figure 51 - Le risque de défluviatation entre la Putih et la Batang	144
Figure 52 - Le canal entre la Batang et la Putih : une zone de défluviatation possible.....	145
Figure 53 - Dégâts provoqués par un débordement ponctuel du lahar du 19 mars 2011 dans la Gendol à Jaranan, 5 km en amont de Ngerdi et 2 km en amont de Plumbon.....	146
Figure 54 - L'inondation du village de Tamanagung	147
Figure 55 - La Code à Yogyakarta : sinuosités, zones exposées, zones inondées et type d'habitat (image Quickbird, 2006).	149
Figure 56 - Les communes du Merapi face à la menace des lahars	154
Figure 57 - Connaissance et perception des lahars autour du Merapi	159
Figure 58 - Maisons partiellement endommagées et maisons détruites par les lahars	162
Figure 59 - Nombre de maisons détruites et endommagées par les lahars	163
Figure 60 - Exemple des dégâts partiels des lahars sur l'habitat	165
Figure 61 - Les dégâts à Sirahan (images GeoEye, juin 2011)	166
Figure 62 - Les dégâts à Jumoyo (image GeoEye, juin 2011)	167
Figure 63 - Les deux catégories de dommages irréversibles.....	168
Figure 64 - Ensevelissement progressif des habitations auparavant endommagées du <i>dusun</i> Glagah (commune de Sirahan) situées dans le corridor de lahar de la Putih	170
Figure 65 - Les dégâts par village (<i>dusun</i>) de la commune de Sirahan. Carte établie d'après des relevés statistiques dressés par la commune.	172
Figure 66 - Les centres d'évacuations accueillant les habitants de Sirahan menacés par les lahars	174
Figure 67 - Sabo-dam et ponts détruits par les lahars.....	175
Figure 68 - Les infrastructures endommagées sur le talus proximal de la rivière Senowo.	176
Figure 70 - Le sabo-dam le plus en amont de la rivière Apu, entièrement comblé par les dépôts de lahars de 2010-2011	177

Figure 69 - Modèle de sabo-dam "ancienne" génération, à déversoirs de dimensions limitées.....	177
Figure 71 - Un exemple de pont emporté en amont de Tamanagung sur la Pabelan.	178
Figure 72 - Les déviations de la quatre-voie Yogyakarta-Semarang (d'après un document officiel du district de Magelang, redessiné et complété)	179
Figure 73 – Exemple de rizières ensevelies à Ngerdi (cliché E. de Bélizal, mai 2011)	180
Figure 74 - Ensablement du canal Mataram (proximité du confluent avec la Batang).....	181
Figure 75 – La lutte contre la sédimentation des rivières sur le talus distal du volcan : incision artificielle des dépôts, création de levées	184
Figure 76 - Enrochements sur les berges de la Putih à 2 km en amont de Jumoyo (A) et (B) bétonnage du chenal sur le talus médial à Srumbung (6 km en amont de Jumoyo)	184
Figure 77 - Un pont temporaire surélevé au-dessus de la Opak à Panggung.	186
Figure 78 - Un exemple de pont permanent suspendu au-dessus de la Boyong à Kemiricilik (amont de la rivière, 8 km du cratère).	187
Figure 79 - Construction de nouveaux logements pour les sinistrés du lahar du 30 mars 2011 à Tamanagung, rivière Pabelan (cliché E. de Bélizal, avril 2011)	189
Figure 80 – Carte d'aléa du BPPTK consacrée aux lahars. BPPTK, octobre 2011.....	191
Figure 81 - Les habitations de Gondomanan (rive droite de la Code dans le centre de Yogyakarta) mis à contribution par les membres de l'association Pecinta Alam pour le balisage communautaire des chemins d'évacuation en cas de lahars (cliché E. de Bélizal, février 2011)	193
Figure 82 - Le posko de Panggung (Opak), une construction sommaire à proximité de la rivière. ...	195
Figure 83 - Organisation et répartition des posko le long des vallées Opak et Gendol.....	196
Figure 84 - Le kentongan : exemple de signaux et explication (cliché E. de Bélizal, avril 2011)	197
Figure 85- Évacuation en période de lahar à travers l'exemple du lahar du 22 mars 2011 à Panggung, rivière Opak.....	199
Figure 86 – Mobilier mis à l'abri pendant un lahar à Teplok.....	200
Figure 87 – Réparation des dégâts après un lahar à Panggung et Teplok.	200
Figure 88 - Les dépôts sur le talus proximal du volcan (clichés E. de Bélizal, avril 2011).....	207
Figure 89 – Les dépôts sur le talus médial du volcan (clichés E. de Bélizal, mars 2011).	208
Figure 90 – Les dépôts sur le talus distal du Merapi.....	209
Figure 91 - Exemple de dépôts affectés par les infrastructures : les sabo-dams sur la Lamat	211
Figure 92 - Sections de calculs de géométrie des dépôts de lahars.....	212
Figure 93 - Localisation des profils topographiques réalisés sur la Boyong et la Opak.....	213
Figure 94 - Le chenal aménagé de la Boyong à Rejodani (cliché E. de Bélizal, avril 2011)	214
Figure 95 - Le corridor de lahars de la Opak affecté par les dépôts de lahars à Teplok	214
Figure 96 – Le corridor de lahars dans la Boyong en mai 2011 (lit mineur entre lignes pointillées) .	215
Figure 97 Le corridor de lahars dans la Opak en mai 2011 (lit mineur entre lignes pointillées)	216
Figure 98 - Lithofaciès des dépôts de lahars du Merapi survenus pendant la saison des pluies 2010-2011	217
Figure 99 – Exemple de lithofaciès à support clastique du talus proximal	218
Figure 100 - Fenêtre de 1 m ² utilisée pour l'étude de la couche S ₃	218
Figure 101 - Dynamiques de déposition des lahars (adapté de Vallance, 2000).....	219
Figure 102 – Les lithofaciès du talus médial : présence de faciès à support clastique ou à support matriciel sur les couches Kemiri (K) et Bronggang (B) (clichés E. de Bélizal, mars 2011).....	221
Figure 103 - Fenêtre de 1 m ² utilisée pour l'étude de la couche Bronggang B ₂	222
Figure 104 – Les lithofaciès à support matriciel du talus distal (cliché E. de Bélizal, mai 2011)	224

Figure 105 – Lithofaciès à support clastique sur le talus distal, exemple d’une coulée de débris de grande intensité, site Pabelan (cliché E. de Bélizal, avril 2011).....	224
Figure 106 - Modèle de lithofaciès de dépôts (adapté de Scott <i>et al.</i> , 1988).....	226
Figure 107 - Localisation des échantillons de sables dans les dépôts volcanoclastiques des flancs sud et ouest du Merapi	228
Figure 108 - Granulométrie des sables dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi	230
Figure 109 - Distance au cratère et granulométrie des sables	231
Figure 110 – Diagramme triangulaire des textures des échantillons de sable dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi	232
Figure 111 - Analyse granulométrique comparative des échantillons de sable dans les dépôts volcanoclastiques du Merapi	234
Figure 112 – Courbes granulométriques des dépôts de lahar des versants ouest et sud du Merapi.	235
Figure 113 - Les dépôts de lahars du Merapi : répartition et enjeux sociétaux	236
Figure 114 - Exemples d'aménagement agricoles des corridors de lahars dans le fond de vallée de la Senowo (clichés E. de Bélizal, août 2009)	237
Figure 115 - Le talus proximal méridional du Merapi, bassin-versant Opak-Gendol.....	242
Figure 116 – Reportage du bulletin d'informations télévisé de la chaîne Metro TV, appelant « lahar froid » la coulée de débris qui emporte le pont de Tlatar.....	249
Figure 117 – Les états dynamiques de la rivière Gendol.....	251
Figure 118 – Les impacts des lahars – aperçu synthétique.....	253
Figure 119 – Site d'extraction à Jambu-Kaliadem. Les dépôts de lahars recouvrent la totalité du fond de vallée.	258
Figure 120 – Bantak (taille : 1,5 m) dans le site d'extraction de Manggong, Gendol.....	259
Figure 121 - Extraction mécanique des dépôts, versant oriental de la Woro	260
Figure 122 -Extraction manuelle des dépôts à Jambu-Kaliadem, Gendol.....	261
Figure 123 - Une carrière dans le site d'extraction de Jambu-Kaliadem, Gendol.	262
Figure 124 - Comparaison de l'organisation des voies d'accès: site de Jurangjero (Putih) et Jambu-Kaliadem (Gendol). A : image Quickbird 2006 ; B : mission ULM septembre 2010.	264
Figure 125 - Quelques vues des extractions dans les vallées du Merapi	265
Figure 126 – Organisation théorique d’un site d’extraction et géomorphologie associée.....	266
Figure 127 - Les sites d'extraction autour du Merapi: organisation générale et évolution..	270
Figure 128 - Fréquentation (en nombre de camions) du site de Jurangjero, Putih, en mai 2002.....	272
Figure 129 - Jurangjero en 2006 (Quickbird, 2006).	273
Figure 130 - Fréquentation (camions et travailleurs) sur deux sites de la Gendol	275
Figure 131 - Répartition horaire moyenne du nombre de passage de camions au péage du site de Jambu-Kaliadem en 2010 (De Bélizal <i>et al.</i> , 2011).....	275
Figure 132 - "L'érosion anthropique" à Jambu-Kaliadem, l'exemple de Kaliadem aval.	277
Figure 133 – Aperçu de l'évolution de la forme de la vallée à Kaliadem aval.....	278
Figure 134 - Rythmes d'extraction par an à Jambu-Kaliadem (A: 2006; B: 2007; C: 2008).	280
Figure 135 - Organisation du site d'extraction de Jambu-Kaliadem en 2010 (Gendol)	282
Figure 136 - Le site satellite d'Argomulyo. Cliché E. de Bélizal, mai 2010.	284
Figure 137 - Deux sites d'extraction du talus proximal. A : le site mineur de Turgo en avril 2010 ; B : le site secondaire de Balerante en juillet 2010. Clichés E. de Bélizal.....	285
Figure 138 - Construction de maisons à Bantul	286

Figure 139 – Atelier de sculpture d'andésite à proximité de la rivière Senowo (cliché D. Grancher août 2009).	287
Figure 140 – Tommettes fabriquées en andésite à proximité du site d'Argomulyo (cliché D. Grancher, août 2009).	287
Figure 141 – Un riverain de la Gendol vient s'approvisionner en matériaux volcaniques pour sa consommation personnelle	288
Figure 142 - Un adolescent rebouche les ornières dans l'une des voies d'accès du site de Jurangjero dans la vallée Putih	289
Figure 143 - Vendeuse de fritures et de thé qui profite d'un camion pour se rendre dans les vallées. Jurangjero, vallée Putih	289
Figure 144 - Recettes annuelles de la taxe gouvernementale sur les extractions de matériaux volcaniques. A : dans le district de Magelang entre 1997 et 2003 (Sudibyo, 2002)	290
Figure 145 - Organigramme simplifié de la gestion publique des extractions dans le district de Magelang.	292
Figure 146 - Organigramme de l'encadrement des extractions de sable.	299
Figure 147 - Insultes à l'égard des autorités.	302
Figure 148 - Talweg de la Putih dans un ancien site d'extraction de la Putih en aval de Jurangjero, abandonné dans les années 2000.	305
Figure 149 – Des marques durables dans le paysage	307
Figure 150 - Perturbation des dynamiques d'érosion sur le versant est de la Woro	309
Figure 151 – Le versant oriental de la Woro en mai 2011 (cliché E. de Bélizal, mai 2011)	310
Figure 152 - Routes endommagées au débouché de la voie d'accès orientale de Jambu-Kaliadem.	311
Figure 153 - Camion emporté par un lahar dans la Boyong (cliché F. Lavigne, 1995)	313
Figure 154 - Répartition des sites d'extraction après l'éruption de 2010	318
Figure 155 - Fréquentation quotidienne moyenne des sites d'extraction du Merapi en 2011.	320
Figure 156 - Fréquentation horaire des sites d'extraction du Merapi sur une journée de travail	321
Figure 157 - Vues des différents types de sites d'extraction après l'éruption de 2011	324
Figure 158 - Les volumes de sables et de blocs extraits après l'éruption de 2010 (juin 2011)	326
Figure 159 - Les sites d'extraction retenus pour l'enquête par questionnaire	328
Figure 160 - Provenance des travailleurs de la Gendol extérieurs à la région du Merapi	332
Figure 161 - Camion piégé par un lahar au site d'extraction de Plumbon, février 2011.	346
Figure 162 - Cartographie des risques liés aux lahars dans les sites d'extraction au Merapi après l'éruption de 2010	350
Figure 163 - Les risques liés aux lahars dans les communes du Merapi.	353
Figure 164 - Schéma d'évolution de l'activité d'extraction au Merapi dans l'espace et dans le temps. En vert : les conséquences bénéfiques.	356
Figure 165 - Approche systémique du risque dans les corridors de lahars du Merapi après l'éruption de 2010	358
Figure 166 – Localisation des sites d'extractions de dépôts volcanoclastiques à Montserrat)	369
Figure 167 – Corridor de lahars et extraction des dépôts volcanoclastiques à Montserrat.	371

Liste des tableaux

Tableau 1 – Organisation et dimension des bassins-versants du Merapi	23
Tableau 2 - Histoire géologique du Merapi : aperçu des différentes interprétations et datations	36
Tableau 3 – Phases de l'éruption du Merapi en 2010 et phénomènes associés (données de Surono <i>et al.</i> , sous presse)	44
Tableau 4 – Les lahars du Merapi : aperçu historique (données de Lavigne <i>et al.</i> , 2000a ; Voight <i>et al.</i> , 2000)	57
Tableau 5 – Utilisation industrielle des roches, verres et minéraux volcaniques (A : Matières premières ; B : Matériaux transformés ; modifié de Dehn et McNutt, 2000)	65
Tableau 6 - Sources de la base de données "lahars 2010-2011"	75
Tableau 7 - Imagerie satellitaire et photographies aériennes utilisées dans la thèse	77
Tableau 8 - Documents et évidences de terrain utilisés pour l'évaluation des débits de pointe des lahars majeurs	82
Tableau 9 - Vidéos personnelles	83
Tableau 10 - Enquêteurs, sites, dates et effectifs du questionnaire de perception 2010	90
Tableau 11 - Entretiens réalisés pour définir l'organisation de la gestion de crise en cas de lahar	92
Tableau 12 – Données secondaires issues des mémoires universitaires indonésiens consacrés aux extractions des dépôts volcanoclastiques du Merapi.....	93
Tableau 13 - Données secondaires issues des bureaux et administrations	95
Tableau 14 – Entretiens réalisés pour comprendre le fonctionnement de l'activité d'extraction.....	97
Tableau 15 – Résumé des données secondaires utilisées pour reconstituer l'activité d'extraction des dépôts volcanoclastiques au Merapi des années 1990 à 2010	99
Tableau 16 - Le questionnaire de 2011 sur l'activité d'extraction des dépôts volcanoclastiques : sites, enquêteurs et effectifs de répondants	103
Tableau 17 - Synthèse : données obtenues, méthodes et résultats.....	106
Tableau 18 - Répartition spatiale, occurrences et fréquences historiques des lahars au Merapi.....	113
Tableau 19 - Débits des lahars d'après enregistrements vidéo personnels	119
Tableau 20 – Relation entre identité des répondants et perception du danger	161
Tableau 21 – Détails des dommages pour chaque village impacté de la commune Sirahan (d'après les relevés statistiques officiels de la commune).....	171
Tableau 22 - Le lourd bilan social des lahars après la saison des pluies 2010-2011 (d'après les données statistiques récupérées dans les administrations des <i>desa</i> . Pour Yogyakarta : Sri Hadmoko <i>et al.</i> , 2012).....	173
Tableau 23 – Nombre d'habitants du <i>desa</i> Sirahan s'étant rendu au moins une fois dans un centre d'évacuation pendant la saison des pluies 2010-2011.....	174
Tableau 24 - Cultures ensevelies à Jumoyo	181
Tableau 25 – Les lahars et leurs dégâts associés – synthèse.....	182
Tableau 26 - Surveillance de l'aléa "lahar" et gestion des risques liés, tableau de synthèse.....	201
Tableau 27 - Aspects géométriques des dépôts de lahars du Merapi (d'après image GeoEye juin 2011)	210

Tableau 28 - Périodes de déclenchement des lahars par rivière (1823-2010). Données reprises de Voight <i>et al.</i> , 2000 et de Lavigne <i>et al.</i> , 2000a	243
Tableau 29 - Crise et catastrophe (modifié de Leone <i>et al.</i> , 2010).....	246
Tableau 30 - Reconstitution des volumes extraits par jour	268
Tableau 31 - Reconstitution des volumes extraits par an.....	269
Tableau 32 - Diamètre des carrières à Jambu-Kaliadem en mai 2010	276
Tableau 33 - Rythmes d'érosion sur une portion de Jambu-Kaliadem entre 2006 et 2010 à Kaliadem aval	279
Tableau 34 – Estimation des prix du sable du Merapi en 2010.....	288
Tableau 35 - Accidents et incidents dans les vallées du Merapi : bilan de 2010 (De Bélizal <i>et al.</i> , 2011)	312
Tableau 36 – Comparaison des prix du sable pratiqués dans plusieurs depo pasir industriel ou de proximité situés à proximité des sites évoqués. Le sable directement vendu hors Merapi coûte entre 5 et 7 fois plus cher (marchés de Solo ou de Semarang). Texture du sable : d'après analyse granulométrique (chap. 5).	325
Tableau 37 – Taux d'interrogation des personnes enquêtées par site (* au jour de l'enquête).....	327
Tableau 38 - Prise de risque dans les sites d'extraction autour du Merapi. Pourcentages de réponses affirmatives par site issus du questionnaire (question 19).	338
Tableau 39 - Résultats du test du khi ² pour l'ensemble des sites d'enquête	340
Tableau 40 - Détail du calcul de la vulnérabilité par site (seuils déterminés d'après les réponses au questionnaire 2011).....	343
Tableau 41 - Détail du calcul des enjeux par site (seuils déterminés d'après les réponses au questionnaire de 2011).....	347
Tableau 42 - Synthèse du calcul du risque pour chaque site.....	348
Tableau 43 - Détail et explication de la typologie des sites d'extraction face au risque.....	349
Tableau 44 - Exemple d'utilisation du détail des facteurs du danger pour réduire les risques dans les sites d'extraction.....	351
Tableau 45 - Les sites d'extraction : des risques d'accident (d'après Leone <i>et al.</i> , 2010)	361
Tableau 46 - Les extractions de matériaux volcaniques (ponces, pouzzolanes notamment) dans le monde (USGS, 2012 – traduit). Valeurs exprimées en tonnes.	367
Tableau 47 - Implication et partage d'information pendant le terrain de thèse (2011)	383

ANNEXES

Le lecteur intéressé trouvera dans cette section l'ensemble des documents qui ont servi de toile de fond à l'élaboration de la thèse. Il s'agit à la fois de données brutes produites par l'auteur, ou bien de documents reproduits pour leur valeur exemplaire. Les collaborations avec des étudiants (constitution de la base de données « LAHARS », de la revue de presse et certains questionnaires) sont clairement référencées. Volontairement volumineuse, cette section a en effet pour but de fournir des données pouvant servir aux travaux ultérieurs, notamment dans le cadre du projet SEDIMER. Les documents ont été classés par thèmes pour faciliter la recherche d'information.

A	Les lahars du Merapi après l'éruption de 2010	A.1 : Base de données « LAHARS » A.2 : Les dommages liés aux lahars de 2010-2011 A.3 : Revue de presse (sites d'extraction et lahars de 2010-2011) A.4 : Liste des vidéos de lahars de 2010-2011 chargées sur YouTube. A.5 : Détails de débits de lahars mesurés d'après enregistrements vidéo sur le talus distal de la Gendol. A.6 : Exemple d'évaluation de la vitesse de surface d'un lahar à partir d'une vidéo.
B	Gestion de crise	B.1 : Exemple de flyer distribué aux riverains de la Boyong-Code B.2 : Un site internet d'information sur les lahars, Jalin Merapi
C	Granulométrie des dépôts de lahars	C.1 : Échelles granulométriques C.2 : Analyses granulométriques C.3 : Distribution granulométrique des échantillons de fractions fines (< 2 mm) C.4 : Courbes granulométriques des échantillons de fractions fines (< 2 mm)
D	Les questionnaires	D.1 : Questionnaire de perception et connaissance de l'aléa lahar (décembre 2010) D.1.1 : Tableau des résultats du questionnaire D.1.2 : Tableaux de contingence et tests du χ^2 du questionnaire D.1 D.2 : Questionnaire préliminaire sur l'activité d'extraction (août 2009) D.3 : Questionnaire sur l'activité d'extraction après l'éruption de 2010 (juin 2011) D.3.1 : Tableau des résultats du questionnaire D.3.2 : Tableaux de contingence et tests du χ^2 du questionnaire D.3 D.4 : Exemple d'un document de travail pour les enquêteurs du questionnaire D.3
E	Les sites d'extraction du Merapi	E.1 : Exemples de tableaux de comptage des camions E.1.1 : Site majeur : Jambu-Kaliadem (Gendol), jeudi 24/06/2010 E.1.2 : Site mineur : Turgo (Boyong), mardi 15/06/2010. E.1.3 : Site secondaire : Balerante (Woro), samedi 15/05/2010. E.2 : Quelques données officielles : les volumes extraits dans la Gendol entre 2000 et 2008. E.3 : Aperçus des sites d'extraction E.4.1 : Principaux sites d'extraction des années 2000 E.4.2 : Sites d'extraction en juin 2011.

Annexes A

Les lahars du Merapi après l'éruption de 2010

A.1 Base de données « LAHARS »

Les données de précipitations proviennent toutes du BPPTK.

L'intensité de précipitations a été établie selon le rapport quantité (mm) / durée (h).

La base de données est la plus complète possible, compilée d'après plusieurs sources, notamment scientifiques, mais il est possible que certains événements n'aient pas été recensés.

No	Date	Rivière	Heure ou durée	Hauteur de l'écoulement	Informations complémentaires	Intensité des pluies (mm/h) au moment du lahar	Impacts	Source
1	27-oct-10	Boyong	?	?	-	?	-	Entretiens
2	03-nov-10	Kuning	15h-?	?	-	?	-	Youtube
3	04-nov-10	Opak	15h-?	< 1 m	Lahar peu abondant : ne déborde pas de la Opak qui coule dans un talweg de dimension modeste (1,5 - 2m de profondeur pour 2 m de large)	?	-	Entretiens
4	05-nov-10	Lamat	12h-?	?	-	?	-	Youtube
5		Boyong	?	?	-	?	-	Youtube
6		Kuning	15h-?	?	Débit très fort. Dépôt 6 m d'épaisseur au barrage Umbulharjo.	?	-	Youtube
7		Putih	?	?	-	?	-	Youtube
8		Krasak	Fin de matinée	?	-	?	-	Entretiens
9	07-nov-10	Putih	11h45-?	1 m	-	?	-	BPPTK
10		Pabelan	09h-?	0,5 m	-	?	-	BPPTK
11	08-nov-10	Pabelan	11h30-?	-	-	?	-	BPPTK
12	09-nov-10	Senowo	11h36-?	-	-	?	Pont emporté	BPPTK
13		Trising	11h38-?	-	-	?	-	BPPTK
14		Lamat	11h45-?	-	-	?	-	BPPTK
15		Apu	11h50-?	-	-	?	-	BPPTK
16	14-nov-10	Boyong	12h25-?	-	-	?	-	BPPTK
17		Senowo	17h-?	-	-	?	-	BPPTK
18	16-nov-10	Batang	12h-?	1 m	-	?	-	BPPTK
19		Apu	13h10-?	1 m	-	?	-	BPPTK
20	21-nov-10	Putih	18h-?	1 m	-	?	-	BPPTK
21	23-nov-10	Senowo	16h30-?	1,5 m	-	?	-	BPPTK
22		Boyong	17h-?	1,5 m	-	?	-	BPPTK
23		Trising	16h40-?	1,5 m	-	?	-	BPPTK
24		Putih	16h15-?	1 m	-	?	-	BPPTK

25	29-nov-10	Putih	16h-?	1,5 m	-	?	-	BPPTK
26		Boyong-Code	15h40-?	2 m	Extension : 26 km	?	-	Youtube
27	30-nov-10	Pabelan	16h15-?	?	-	?	-	BPPTK
28		Apu	16h15-?	?	-	?	-	BPPTK
29	01-déc-10	Boyong	12h30-?	?	-	?	-	Youtube
30		Ladon	13h15-?	?	-	?	Pont emporté (Sepi-Bakalan)	BPPTK
31		Apu	12h45-?	1,5 m	-	?	-	BPPTK
32		Juwah	13h20-?	1 m	-	?	-	BPPTK
33		Woro	13h40-?	1 m	-	?	-	BPPTK
34		Pabelan	13h50-?	80 cm	-	?	-	BPPTK
35		Senowo	13h40-?	2,5 m	-	?	-	BPPTK
36		Putih	12h-13h25	2 m	-	?	Ponts emportés à Magelang. Fermeture et inondation de la jl Magelang-Jogja	BPPTK
37	02-déc-10	Opak	15h-16h	< 1 m	Vallée peu élargie. Lahar de petite intensité.	?	-	Entretiens
38		Putih	14h-15h	1,25 m		?	-	BPPTK
39		Apu	15h-?	< 1 m	Faible intensité.	?	-	BPPTK
40		Trising	15h-?	< 1 m	Faible intensité.	?	-	BPPTK
41		Senowo	15h-?	< 1 m	Faible intensité.	?	-	BPPTK
42		Blongkeng	?	?	-	?	-	Entretiens
43	03-déc-10	Apu	09h-?	0,75 m	-	?	-	BPPTK
44		Ladon			-	?	-	BPPTK
45		Juwah			-	?	-	BPPTK
46	04-déc-10	Boyong	11h10-?	1 m	-	8	-	BPPTK
47	05-déc-10	Putih	11h05-12h	1m	-	29	Fermeture de la jl Magelang Jogja	BPPTK
48		Putih	14h40-15h15	1 m	-	2	-	BPPTK
49	06-déc-10	Putih	16h05-16h30	1,5 m	-	?	-	Entretiens
50	07-déc-10	Apu	19h50-?	1 m		6	-	BPPTK
51		Ladon	19h50-?	2 m		6	-	BPPTK
52		Juwah	19h50-?	3 m		8	-	BPPTK
53	08-déc-10	Krasak	16h-18h30	?	Abondance de dépôts : risque d'embâcle au pont KR-6. Déblaiement (pelleteuses fournies par le Proyek Merapi).	32	-	Entretiens
54		Boyong	14h45-?	?	-	27	-	BPPTK
55		Apu	16h-?	1 m	-	30	-	BPPTK
56		Ladon	16h-?	2 m	-	30	-	BPPTK
57		Putih	15h-?	2 m	-	30	Fermeture de la jl Magelang Jogja	BPPTK
58	15-déc-10	Putih	?	?	-	< 1 h	-	Entretiens
59	18-déc-10	Apu	17h10-?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
60		Juwah	17h-?	0,5 m	-	< 1 h	-	BPPTK
61		Ladon	17h-?	0,5 m	-	< 1 h	-	BPPTK
62		Trising	17h10-?	?	-	15	-	BPPTK
63	20-déc-10	Apu	21h10-?	?	-	15	-	BPPTK
64		Senowo	21h10-?	?	-	15	-	BPPTK

65		Trising	21h10-?	?	-	15	-	BPPTK
66		Juweh	21h10-?	?	-	16	-	BPPTK
67		Boyong	21h55-?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
68		Putih	21h50-22h10	1-1,5 m	-	10	-	BPPTK
69	21-déc-10	Senowo	17h40-?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
70		Ladon	17h15-17h40	1 m	-	< 1 h	-	BPPTK
71		Apu		1 m	-	< 1 h	-	BPPTK
72	23-déc-10	Opak	?	?	Débordement et élargissement du lit de la Opak.	21	Rizières inondées.	Entretiens
73		Bebeng	17h35-?	1 m	-	5	-	BPPTK
74		Putih	17h10-18h45	1-1,5 m	-	7	-	BPPTK
75	26-déc-10	Bebeng	18h-?	?	-	24	-	BPPTK
76		Ladon	15h-?	0,5 m	-	< 1 h	-	BPPTK
77		Juweh	18h15-?	?	-	5	-	BPPTK
78		Boyong	18h-?	30 cm	-	24	-	BPPTK
79		Senowo	17h50-?	1 m	-	9	-	BPPTK
80		Putih	18h-?	1 m	-	17	-	BPPTK
81	27-déc-10	Opak	?	< 1 m	-	< 1 h	-	Entretiens
82	30-déc-10	Opak	?	< 1 m	Lahar d'assez forte intensité. Embâcle au pont de Panggung: déversement du lahar dans la petite rivière qui coule 170m à l'ouest. Elargissement de la vallée. Blocs déposés sur la berge.	32	Les arcades du pont de Panggung déjà presque entièrement ensablées. Inondation des rizières et du village de Panggung.	Entretiens
83	31-déc-10	Ladon	15h40-?	1 m	-	< 1 h	-	BPPTK
84		Apu	15h40-?	1 m	-	< 1 h	-	BPPTK
85		Putih	17h30-?	< 1 m	-	14	-	BPPTK
86	01-janv-11	Putih	21h45-?	?	-	26	-	BPPTK
87		Ladon	01h25-?	1 m	-	3	-	BPPTK
88		Bebeng	22h15-?	?	-	26	-	BPPTK
89	02-janv-11	Apu	14h30-?	1 m	-	50	-	BPPTK
90		Ladon	14h30-?	1 m	-	50	-	BPPTK
91	03-janv-11	Putih	18h20-?	2 m (3 m à 19h40)	96 mm pluie de 17h35 à 22h10. Lahar qui a inondé Jumoyo pendant la nuit (20h25), dusun Gembol.	17	Inondation de la route de Magelang. Fermeture. Débordement, près d'une centaine d'habitations abîmées.	Entretiens
92		Ladon	22h-?	1 m	-	10	-	BPPTK
93		Opak	Nuit	2 m	Lahar de grande intensité.	?	Débordement: destruction du pont de Panggung et du bureau de police de Cangkringan.	Entretiens
94	04-janv-11	Opak	?	?	-	?	-	Entretiens
95	08-janv-11	Juweh	15h50-?	0,75 m	-	21	-	BPPTK
96		Ladon	15h50-?	0,75 m	-	28	-	BPPTK
97		Gendol	14h55-?	?	-	18	-	BPPTK
98		Opak	14h55-?	?	-	18	-	BPPTK

99	09-janv-11	Putih	18h-20h	2,5-3 m, max 4 m à 18h30 Extension > 25 km	Destruction de Sirahan	28	Inondation et fermeture de la jl Magelang à 18h30. 3 – 4 m de matériel sur la route, 7 Desa touchés : Sirahan, Trayem, Jetis, Glagah, Salakan, Ngemplak, CandiFemme tuée à Sirahan, probablement le gros lahar qui a dévasté le village en passant par la route	BPPTK
100		Ladon	17h25-19h	1 m	275 mm de pluies sur le v ouest	25	Pont emporté (Bandungsari-Jrakah).	BPPTK
101		Juweh	17h25-19h	1 m	-	26	-	BPPTK
102		Opak	17h30-19h20		-	< 1 h	-	BPPTK
103		Boyong	17h30-19h20		-	< 1 h	-	BPPTK
104		Gendol	17h30-19h20		-	< 1 h	-	BPPTK
105		Krasak	19h-?	?	-	?	-	BPPTK
106		Bebeng	19h-?	?	-	?	-	BPPTK
107		Apu	?	2,5 - 3 m	-	25	Pont Tlogolele-Klakah emporté.	BPPTK
108		Trising	?	2,5 - 3 m	-	28	-	BPPTK
109		Senowo	?	2,5 - 3 m	-	28	-	BPPTK
110	10-janv-11	Senowo	?	?	-	8	-	Entretiens
111	11-janv-11	Ladon	15h50-?	2 m	-	?	-	BPPTK
112		Juweh	15h50-?	2 m	-	?	-	BPPTK
113	14-janv-11	Gendol	?	?	Bronggang touché	?	3 maisons touchées	Entretiens
114	15-janv-11	Putih	20h15-?	1,5 m	-	11	20h30 route de Magelang fermée, inondée à 21h.	BPPTK
115		Pabelan	15h50-?	?	-	17	Effondrement du pont de Tlatar	BPPTK
116	16-janv-11	Ladon	14h50-?	1,75 m	-	< 1 h	Dam Kali Apu submergé	BPPTK
117		Juweh	14h50-?	1,75 m	-	< 1 h	-	BPPTK
118	17-janv-11	Apu	19h45-?	1,5 m	-	7	-	BPPTK
119		Juweh	19h45-?	1,5 m	-	7	-	BPPTK
120		Putih	19h45-21h25	1,5 m	-	8	Route de Magelang close à 19h50, inondée à 20h15 et rouverte à 05h le 18 janvier.	BPPTK
121		Ladon	19h45-?	1,5 m	-	10	-	BPPTK
122		Senowo	19h30-?	?	-	10	-	BPPTK
123	20-janv-11	Senowo	?	1 m	-	?	-	BPPTK
124		Apu	15h15-17h	0,5 m	-	?	-	BPPTK
125		Putih	14h50-16h10	1 m	130 mm de pluie de 12h50 à 16h.	25	-	BPPTK
126		Ladon	15h15-?	0,5	-	?	-	BPPTK
127		Trising	?	?	-	?	-	BPPTK
128		Juweh	15h15-17h	0,5 m	-	11	-	BPPTK
129	22-janv-11	Putih	14h-15h20	1 m	-	8	14h27 route de Jgja Magelang fermée et inondée.	Primaire
130	23-janv-11	Gendol	?	?	-	?	-	BPPTK

131		Opak	?	?	-	?	-	BPPTK
132		Kuning	?	?	-	?	-	BPPTK
133		Putih	13h55-15h55	2 m	43 mm de pluie par heures enregistrées à Ngepos.	40	Route close à 14h. Fermeture et inondation de la route Yogya-Magelang à 14h19, route bloquée jusqu'à 3h du matin. 2 m de dépôts sur 500 m de long.	Primaire
134		Apu	13h25-?	0,5 m	-	33	-	BPPTK
135		Juwah	13h25-?	0,5 m	-	25	-	BPPTK
136		Ladon	13h25-14h45	0,5 m	-	33	-	BPPTK
137	24-janv-11	Putih	16h-?	0,5 m	-	40	-	BPPTK
138		Senowo	14h-?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
139		Ladon	13h50-15h15	0,5 m	-	23	-	BPPTK
140		Juwah	13h50-15h16	0,5 m	-	11	-	BPPTK
141		Apu	13h50-?	0,5 m	-	23	Pont de la kali Apu est emporté par le lahar	BPPTK
142		Gendol	14h45-?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
143	27/01/2011	Putih	14h45-?	1 m	-	< 1 h	Route Magelang-Jogja fermée à 15h30.	Primaire
144	02-févr-11	Putih	18h-19h20	2 m	15h40-21h30: 77mm de pluie.	14	Route Magelang-Jogja fermée à 18h15, inondée à 18h35.	BPPTK
145		Putih	22h40-23h55	2 m	17h30-24h: 50 mm de pluie.	14	-	BPPTK
146		Boyong	18h25-21h25	< 0,5 m	-	32	-	BPPTK
147	04-févr-11	Putih	14h44-15h46	> 2,5 m	-	21	-	BPPTK
148		Putih	20h25-21h10	1,5 m	-	13	-	BPPTK
149		Boyong	15h03-17h	0,5 m	-	37	-	BPPTK
150		Ladon	14h30-?	0,5 m	-	10	-	BPPTK
151		Juwah	18h35-?	0,5 m	-	7	-	BPPTK
152		Apu	22h-?	0,5 m	-	19	-	BPPTK
153		Krasak	21h-?	?	-	10	2 victimes	BPPTK
154	05-févr-11	Gendol	?	?	Front important	?	-	Entretiens
155		Opak	?	?	-	?	-	Entretiens
156	09-févr-11	Krasak	?	?	-	?	-	Entretiens
157	19-févr-11	Putih	17h20-?	1 - 1,5 m	-	35	-	BPPTK
158	21/02/2011	Opak	17h-?	?	Ecoulement de taille moyenne	< 1 h	Changement de tracé hydrographique et inondation de Kliwang	Entretiens
159		Kuning	18h-?	70 cm	-	< 1h	-	Entretiens
160	24/02/2011	Gendol	?	?	-	< 1 h	-	Entretiens
161	26/02/2011	Kuning	14h30-15h45	50 cm	-	< 1 h	-	Entretiens
162	28/02/2011	Opak	?	50 cm	-	7	-	Entretiens
163		Boyong	16h10-?	50 cm	-	7	-	Entretiens
164		Juwah	17h50-?	1 m	-	10	-	Primaire
165		Gendol	16h15-18h	1,5-2m	-	< 1 h	-	BPPTK

166		Putih	?	1 m	-	11	-	BPPTK
167		Kuning	16h-?	< 1 m	-	< 1 h	-	Entretiens
168		Gendol	15h-?	< 1 m	-	3	-	Entretiens
169		Gendol	17h-?	1,5-2 m	-	3	-	Entretiens
170		Trising	16h-?	?	-	39	-	BPPTK
171		Putih	16h30-?	?	-	39	Route Magelang-Jogja fermée à 17h.	BPPTK
172		Opak	?	?	-	?	-	BPPTK
173		Senowo	16h-?	?	-	39	-	BPPTK
174	04/03/2011	Pabelan	16h30-?	?	-	39	-	BPPTK
175		Ladon	16h50-?	2 m	-	25	-	BPPTK
176		Juwah	16h50-?	2 m	-	18	-	BPPTK
177		Bebeng	16h45-?	1-1,5 m	-	< 1h	-	BPPTK
178		Boyong	17h20-?	1 m	-	3	-	Entretiens
179		Kuning	17h30-?	?	-	3	-	Entretiens
180		Ladon	16h55-?	1 m	-	6	-	BPPTK
181	05/03/2011	Juwah	16h55-?	1 m	-	5	-	BPPTK
182		Krasak	16h50-?	40 cm	-	11	-	Entretiens
183		Boyong	17h20-17h50	70 cm	-	10	-	Primaire
184	08/03/2011	Kuning	?	?	-	10	-	Entretiens
185		Putih	17h-17h50	75 cm	-	17	-	BPPTK
186		Bebeng	18h15-?	1-1,5 m	-	28	-	BPPTK
187	11/03/2011	Gendol	18h30-?	?	-	12	-	BPPTK
188		Putih	18h30-?	1-1,5 m	-	20	-	BPPTK
189		Gendol	16h45-?	< 1 m	-	18	-	Primaire
190	14/03/2011	Boyong	17h30-?	1 m	-	18	-	Entretiens
191		Boyong	17h-?	?	-	10	-	Entretiens
192	17/03/2011	Putih	17h30-18h20	< 1 m	-	8	-	Entretiens
193		Gendol	17h30-?	> 1 m	-	76	-	Entretiens
194		Opak	17h30-?	> 1 m	-	76	-	Entretiens
195		Juwah	17h-?	0,5 m	-	16	-	BPPTK
196		Ladon	17h-?	0,5 m	-	14	-	BPPTK
197		Boyong-Code	17h30-?	> 2 m > 25 km	-	76	-	Entretiens
198	19/03/2011	Krasak	17h30-?	> 1 m	-	40	-	Entretiens
199		Putih	17h30-?	1,5 m	-	27	Sirahan inondé (Salakan, Candi, Sirahan). Route Magelang Jogja fermée à 17h10, inondée à 17h20 (50 cm sur 25 m).	Entretiens
200		Gendol	15h30-17h	1 m	-	< 1m	-	Primaire
201		Ladon	16h25-?	0,5 m	-	25	-	BPPTK
202		Kuning	16h-?	?	-	< 1m	-	Entretiens
203	21/03/2011	Krasak	17h30-?	?	-	< 1 m	-	Entretiens
204		Putih	15h40-16h30	?	-	47	Sirahan inondé (Salakan, Candi, Sirahan). Jl Magelang fermée à 16h15, puis inondée (30 cm sur 50 m).	Entretiens

205	22/03/2011	Gendol	13h40-?	2 m	-	16	Plumbon inondé. 3 pelleteuses emportées à Jambon.	BPPTK
206		Opak	14h15-?	> 2 m	-	16	Panggung et Teplok inondé	Primaire
207		Putih	14h20-?	?	-	10	Jl Magelang fermée à 15h10, inondée 25 cm sur 15 m plus tard.	BPPTK
208	28/03/2011	Ladon	17h30-?	?	-	14	-	BPPTK
209	29/03/2011	Ladon	18h10-?	?	-	< 1 m	-	BPPTK
210	30/03/2011	Ladon	18h30-?	?	-	52	-	BPPTK
211		Putih	17h26-?	?	-	40	Route Magelang Jogja fermée, mais pas inondée.	BPPTK
212		Pabelan	19h-?	> 3 m	269 mm pluie sur le versant occidental Extension > 25 km	44	Gros lahar qui a démolie le pont de Sidoharjo sur Jl Magelang, au nord de Muntilan.	BPPTK
213	03/04/2011	Senowo	17h30-?	?	-	40	-	BPPTK
214		Apu	15h30-?	0,5 m	-	13	-	BPPTK
215		Ladon	15h30-?	0,5 m	-	13	-	BPPTK
216	04/04/2011	Putih	14h35-?	1 m	10 m de large à Ngepos (Srumbung)	9	Jl Magelang n'a pas été fermée. Pas de débordement.	BPPTK
217		Putih	?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
218		Gendol	?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
219	08/04/2011	Kuning	?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
220		Apu	15h15-?	1 m	-	7	-	BPPTK
221		Ladon	15h15-?	1 m	-	7	-	BPPTK
222	11/04/2011	Boyong	17h-?	?	-	5	-	BPPTK
223	14/04/2011	Gendol	16h30-?	?	RSAM SBY1 6340/5000	< 1 h	-	BPPTK
224		Opak	17h-?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
225		Boyong	16h25h-?	?	-	< 1 h	-	BPPTK
226		Krasak	18h-?	?	-	7	-	BPPTK
227		Putih	17h-40-?	?	-	5	-	BPPTK
228	17/04/2011	Putih	19h26-?	< 1 m	-	8	-	BPPTK
229	20/04/2011	Senowo	14h-?	< 1 m	-	3	-	BPPTK
230		Pabelan	14h30-?	< 1 m	-	3	-	BPPTK
231		Krasak	20h30-?	< 1 m	RSAM SKR1 5313/5000	< 1 h	-	BPPTK
232		Boyong	18h15-?	1 m	RSAM SBY1 8028/5000	23	-	BPPTK
233		Gendol	19h31-?	< 1 m	RSAM GDN1 5977/5000	23	-	BPPTK
234	21/04/2011	Gendol	16h-17h	< 1 m	-	< 1 h	-	BPPTK
235	23/04/2011	Gendol	12h45-?	?	RSAM GDN1 5168/5000	19	-	BPPTK
236	29/04/2011	Boyong	21h13-?	?	RSAM SBY1 11391/5000, SBY2 352/5000. 21h19 : RSAM SBY1 8522/5000	< 1 h	-	BPPTK
237		Pabelan	21h-?	?	-	?	-	BPPTK
238	01/05/2011	Gendol	18h10-?	>25 km	RSAM GDN1 6675/5000 18h08, 7591/5000 18h14, 7947/5000 18h30 6035/5000 20h12	41	-	BPPTK

239		Opak	18h-?	?	-	41	3 maisons inondées, 1 maison endommagée.	BPPTK
240		Boyong	18h-?	18h45 : 180 cm Plemburan ; 240 cm 19h10. Descend vers 20h40. Ngenthak : 140 cm vers 19h50 ; 110 cm à 20h37.	RSAM SBY1 7000/5000 19h15 ; 6000/5000 20h10	41	Grandes hauteurs d'eau en boyong aval (Rejodani, Plemburan) > 2 m. Peu de matériel (lahar peu intense) et pluie abondante. 19h20 : Code en crue, 80 cm d'eau dans les maisons proches de la rivière. Evacuations des zones suivantes lancées Jogoyudan, Ledok, Kota Baru, Prawirodirjan. < 3 cm à 20h30 dans les zones inondées.	BPPTK
241	31/10/2011	Putih	?	?	-	-	Camions bloqués	Etudiants
242	03/11/2011	Gendol	16h30	< 1 m	-	-	-	Etudiants
243		Apu	17h00	2,5 m	-	-	-	Etudiants
244		Putih	15h30 (POS)	2 m	-	-	Jalan Magelang fermée	Etudiants
245		Boyong	16h30	< 1 m	-	-	-	Etudiants
246	04/11/2011	Boyong	20h40 - 23h	< 1 m	-	-	-	Etudiants
247		Gendol	20h40 - 23h	< 1 m	-	-	-	Etudiants
248		Kuning	20h40 - 23h	< 1 m	-	-	-	Etudiants
249	09/11/2011	Gendol	13h - 14h20	< 1 m	-	-	-	Etudiants
250	19/11/2011	Woro	16h15	< 1 m	-	-	-	Etudiants
251	20/11/2011	Putih	13h50 (POS)	1,5 m	-	-	2 camions bloqués	Etudiants
252		Boyong	13h40-?		-	-	-	Etudiants
253	28/11/2011	Gendol	15h15 - 17h15	< 1 m	-	-	camions bloqués	Etudiants
254		Putih	16h40 (POS)	3 m	-	-	4 camions bloqués, 4 maisons endommagées, 2 maisons détruites, 84 personnes évacuent Blongkeng	Etudiants
255		Boyong	16h20 - 17h05	< 1m	-	-	-	Etudiants
256	03/12/2011	Putih	15h50 (POS)	0,5 m	-	-	-	Etudiants
257		Pabelan	15h40-?	1m	-	-	-	Etudiants
258		Senowo	14h40-?	1m	-	-	-	Etudiants
259		Apu	14h40-?	1m	-	-	-	Etudiants
260	19/12/2011	Gendol	17h-?	?	-	-	-	Etudiants
261		Putih	?	0,5 m	-	-	-	Etudiants
262	20/12/2011	Putih	12h40 - 13h30	1 m	-	-	-	Etudiants
263		Bebeng	12h40-?	?	-	-	-	Etudiants
264		Krasak	13h40-?	?	-	-	-	Etudiants
265		Gendol	14h-?	< 1 m	-	-	-	Etudiants
266		Boyong	14h-?	< 1m	-	-	-	Etudiants
267	23/12/2011	Putih	?	< 0,5 m	-	-	-	Etudiants
268	24/12/2011	Putih	?	< 0,5 m	-	-	-	Etudiants
269	01/01/2012	Gendol	16h15	3,5 m	-	-	-	Etudiants
270		Boyong	15h55	?	-	-	-	Etudiants

271		Woro	?	?	-	-	-	Etudiants
272	18/01/2012	Gendol	?	?	-	-	2 ponts fermés	Etudiants
273	21/01/2012	Putih	?	?	-	-	-	Etudiants
274		Bebeng	?	?	-	-	-	Etudiants
275		Krasak	?	?	-	-	2 camions emportés	Etudiants
276	25/01/2012	Pabelan	?	?	-	-	-	Etudiants
277		Blongkeng	?	?	-	-	-	Etudiants
278		Lamat	?	?	-	-	-	Etudiants
279		Putih	?	?	-	-	1 maison détruite	Etudiants
280		Batang	?	?	-	-	-	Etudiants
281		Bebeng	?	?	-	-	-	Etudiants
282		Krasak	?	?	-	-	-	Etudiants

Annexe A.2 – Les dommages liés aux lahars de 2010-2011

RIVIERE	COMMUNE	DUSUN	DOMMAGES						
			MAISONS DETRUITES	MAISONS ENDOMMAGEES	AUTRES DOMMAGES				
					INFRASTRUCTURES	SURFACES CULTIVEES (m ²)	TERRAINS NON CULTIVES (PUBLIC / PRIVE) m ²	CARACTERISTIQUES	AUTRES
GENDOL	Sindumartani	Tambakan	6	8	-	10500	0	-	5 bassins de pisciculture enterrés Canaux d'irrigation bouchés
		Jambon	0	0	Route du pont Jambon abîmée Route Jambon-Kentingan ensevelie	0	0	-	-
		Jambon Kidul	0	6	Barrière effondrée	0	0	-	700 m de canalisations détruits Levées de canaux d'irrigation endommagées à Sembodo et Pulerejo.
		Morangan	0	10	-	0	37000 14000	Terrains publics ensevelis 7 terrains privés ensevelis	700 m de canalisations emportés 90 puits inutilisables
		Kentingan	0	10	-	0	0	-	-
		Kayen	32	30	Effondrement de pont	0	0	-	Canaux d'irrigation bouchés
		Plumbon	6	27	Digue de la Gendol coupée Route du pont Plumbon abîmée	0	10000	Terrains loués à des particuliers.	120 m de canaux d'irrigation détruits
		Bokesan	0	12	Route du pont coupée	0	0	-	Canaux d'irrigation bouchés
		Ngerdi	0	51	-	30000	18000	Terrains privés	-
		Pajangan	0	0	Route et fondations du pont endommagées	0	0	-	-

		Bangsas	0	0	-	14000	22500	Terrains loués à des particuliers.	-
		Ngasem	0	0	-	0	0	-	500 m de canalisations endommagées
		Koripan	0	0	-	0	0	-	4 bassins de piscicultures enterrés
		Jaranan	22	0	-	0	0	-	-
		Brongkol	3	0					
		Guling	5	0					
		Banaran	5	0	-	0	0	-	-
OPAK	Argomulyo	Kliwang	5	8	-	8500	0	-	-
		Panggung	3	6	-	0	0	-	-
		Teplok	1	9	-	92400	0	-	-
		Suruh	4	0	-	0	0	-	-
		Gadingan	1	0	-	0	0	-	-
	Bimomartani	Banjarharjo	0	2	Digue effondrée	0	0	-	-
					Pont endommagé				
		Giyan	0	1	5 digues endommagées	0	0	-	-
		Pondok Dawung	0	0	-	3000	0	-	-
		Sorasan	0	0	3 digues endommagées	15000	2000	-	-
		Rogbangsan	0	0	Digue endommagée	1000	0	-	-
					Pont endommagé				
		Kalibulus	0	0	Digue endommagée	2500	0	-	-
		Koroulon Lor	0	0	Pont et barrage abîmé	0	0	-	-
		Koroulon Kidul	0	0	-	0	8000	-	-
		Krebet	0	0	2 digues endommagées	2500	300	Terrain privé	-
PUTIH	Jumoyo	Babadan	0	0	-	1640	0	-	-
		Batang	1	0	-	0	0	-	-
		Dowakan	0	0	-	2200	4737	-	-
		Gempol	49	52	-	78599	56937	-	-
		Gulon	1	0	-	4000	0	-	-
		Jakarta	1	0	-	0	0	-	-

		Jumoyo Lor	0	0	-	9000	6360	-	-
		Jumoyo Kidul	0	0	-	13750	0	-	-
		Kadirogo	0	1	-	23925	1220	-	-
		Karanggawang	0	0	-	2000	18264	-	-
		Kauman	0	1	-	0	0	-	-
		Kemburan	0	0	-	7000	15615	-	-
		Kemiren	0	0	-	0	8180	-	-
		Ngresap	0	0	-	710	0	-	-
		Pendem	0	0	-	2500	0	-	-
		Pulosari	1	0	-	1500	0	-	-
		Seloiring	9	7	-	25070	13859	-	-
		Semarang	1	0	-	0	0	-	-
		Senden	0	1	-	0	0	-	-
		Srumbung	0	0	-	3500	0	-	-
		Sucen	1	0	-	0	0	-	-
		Tangkilan	0	0	-	455	0	-	-
		Tegalsari	1	4	-	33020	15625	-	-
		Wironayan	1	0	-	0	0	-	-
	Sirahan	Sirahan	11	41	-	294701	0	-	-
		Glagah	9	35	-		0	-	-
		Jetis	4	36	-		0	-	-
		Tempelan	0	0	-		0	-	-
		Berokan	0	0	-		0	-	-
		Precetan	0	0	-		0	-	-
		Salakan	11	57	-		0	-	-
		Gemampang	1	24	-		0	-	-
		Gedolon	0	0	-		0	-	-
		Gudang	0	0	-		0	-	-
		Trayem	0	5	-		0	-	-
		Ngemplak Lor	0	0	-		0	-	-
		Ngemplak Kidul	0	0	-		0	-	-

		Purwosari	0	1	-		0	-	-
		Candi	1	17	-		0	-	-
		Gebayan	0	1	-		0	-	-
PABELAN	Tamanagung	Sidoharjo	19	0	-	0	0	-	-
TOTAUX			215	463		682970	252597		
						68,2 ha	25,3 ha		

Tableau construit d'après les relevés statistiques donnés par les communes touchées par les lahars, à part Yogyakarta, dont la mairie n'a pas été en mesure de communiquer ces données.

Annexe A.3 – Revue de presse (sites d'extraction et lahars 2010-2011)

KR : Kedaulatan Rakyat

Les articles de presse du n°1 (2 février 1986) au n°247 (5 mars 2010) ont été compilés par E. de Bélizal d'après les archives du BPPTK. Ils relatent les principales évolutions qu'a connues l'activité d'extraction depuis les années 1980 jusqu'à l'éruption de 2010.

Les articles de presse du n°248 (27 octobre 2010) au n°641 (29 avril 2011) ont été compilés par les étudiants de la Faculté de Géographie de l'Université Gadjah Mada de Yogyakarta. Ils concernent l'éruption, ainsi que l'événementiel des lahars. Les données concernant les dommages, toutefois, ne sont pas toujours réalistes. Le 4 mars 2011 (n°614), le journal KR annonce 109 maisons ensevelies dans la Pabelan, chiffre qui n'a été vérifié auprès d'aucune commune.

	Date	Titre	Journal				
				16	10/02/1992	Dikhawatirkan terjadi erosi berat di kawasan lereng gunung Merapi	KR
1	02/02/1986	Di puncak Gunung Merapi: jutaan meter kubik lahar	Suara Merdeka	17	19/02/1992	Guguran lava pijar Merapi diperkirakan akan berlangsung dua tahun	Suara Pembaruan
2	05/04/1986	Muntahkan pasir Gunung Merapi, rahmat bagi masyarakat DIY	KR	18	21/02/1992	Dua truk pengangkut pasir terjebak banjir lahar hujan	Suara Merdeka
3	03/01/1987	Endapan material Merapi longsor lagi	Suara Merdeka	19	24/02/1992	Penambangan pasir Merapi malam hari dilarang	Suara Karya
4	02/01/1987	11 truk pasir terjebak, seorang sopir meninggal	KR				
5	04/02/1987	Merapi tragedi dan rezeki	KR	20	07/09/1992	Tanggul aliran lahar Merapi rusak akibat penggalian pasir	Suara Pembaruan
6	20/02/1987	Penyewelengan di lembah bisa menimbulkan bencana	KR	21	15/09/1992	Presiden tinjau penahan sedimen di lereng Merapi	KR
7	05/03/1987	Berburu andesit Merapi	KR				
8	10/03/1987	Penduduk desa Ngepos takut tidur khawatir jadi korban lahar dingin	KR	22	30/10/1992	Akibat penambangan pasir liar, dam penahan sedimen Merapi jebol	KR
9	? 1988	Mendaki dan mengamati Merapi	KR	23	03/11/1992	11 truk gajah kepergok polisi ambil pasir di daerah larangan	KR
10	15/01/1992	Penambang pasir Gunung Merapi tidak mengindahkan keselamatan lingkungan	Suara Pembaruan	24	03/11/1992	Pemda diminta kelola langsung penambangan pasir Gunung Merapi	Suara Merdeka
11	27/01/1992	Truk pengangkut pasir Merapi dilarang masuk	Bernas	25	04/11/1992	Dam sabo Merapi ambrol karena penambangan liar	Suara Karya
12	04/02/1992	Kawasan Jurangjero tertutup untuk kendaraan pasir	KR	26	09/11/1992	DPRD DIY minta penambangan pasir Merapi agar diperketat	Kompas
13	05/02/1992	Merapi dan manfaatnya	KR	27	16/11/1992	Buruh penambang pasir keberatan dikumpulkan	KR
14	06/02/1992	Merapi	Suara Pembaruan				
15	07/02/1992	Tak peduli	Kompas	28	18/11/1992	Truk pasir hindari jembatan timbang bisa merusak kalur alternatif	KR

29	19/11/1992	Banjir lahar di kali Bebeng, puluhan truk terjebak	Suara Merdeka	54	13/08/1996	Para penambang pasir diminta wasapada	Suara Merdeka
30	28/11/1992	Penambangan pasir ditangani secara terpadu	Suara Karya	55	23/10/1996	Perlu waspada	KR
31	24/04/1993	Rame-rame nonton letusan	Kompas	56	29/10/1996	Bupati Magelang perintahkan penghentian pengambilan pasir	Suara Merdeka
32	14/05/1993	Telah mempunyai izin tapi belum menambang	KR				
33	17/05/1993	Tanah Kepuharjo memang kaya bebatuan	KR	57	31/10/1996	Dilanggar, larangan penambangan pasir Merapi	Suara Merdeka
34	25/06/1993	Pengendalian pemakaian air bawah tanah perlu perhatian serius	Bernas	58	02/11/1996	Anehnya penduduk tak menghirankan	Suara Merdeka
35	23/11/1993	Bekas galian pasir Merapi berubah jadi danau	Suara Merdeka	59	04/11/1996	Penambang pasir nekat Bupati Magelang kesal	Suara Merdeka
36	26/01/1994	Pengambil material Merapi harus dapat rekomendasi Proyek Merapi	KR	60	05/11/1996	Penambang belum buat surat penyatan	Suara Merdeka
				61	27/11/1996	Pekerjaan risiko, penghasilan lumayan	KR
37	03/10/1994	Pemohon SIPD tak perlu minta rekomendasi ke Proyek Merapi	Suara Merdeka	62	06/12/1996	Banjir lahar benamkan 19 truk	Kompas
38	03/10/1994	Penambang pasir harapkan banjir lahar	Suara Merdeka	63	06/12/1996	17 truk dan 4 warung dilalap lahar Merapi	KR
				64	06/12/1996	17 truk terjebak banjir lahar	Suara Merdeka
39	14/10/1994	Hujan turun di Merapi, lereng Barat seperti lautan pasir	Suara Merdeka	65	07/12/1996	Ratusan penduduk kesulitan air	KR
40	14/12/1994	Dua truk terpendam lahar dingin Merapi	Suara Merdeka	66	09/12/1996	16 truk terakuasi, satu hilang	Suara Merdeka
41	14/12/1994	Dua truk terjebak banjir kali Bebeng	KR	67	09/12/1996	Alat berat terjebak lahar	?
42	15/12/1994	Banjir lahar di kali Bebeng	Suara Merdeka	68	04/02/1997	Banjir lahar dingin rezeki buat lebaran	KR
				69	06/07/1997	Krisis air di Klaten	Suara Pembaruan
43	20/01/1995	Masyarakat diminta waspadai lahar dingin Merapi	Suara Merdeka	70	07/08/1997	Tiga beru pengeruk pasir Merapi dirusah massa	?
44	02/02/1995	Tiga truk terjebak lahar dingin	Suara Merdeka	71	02/12/1997	Pesimis, Kali Woro dapat kiriman pasir	KR
45	27/03/1995	Alat berat dikerahkan untuk mengeruk lahar	KR	72	02/12/1997	Lahar hujan ancam kawasan Merapi	Yogya Pos
46	21/05/1995	Berkah Merapi	KR	73	18/12/1997	Kubah lava Merapi naik secara drastis	Kompas
47	22/05/1995	Dua truk hancur dilalap banjir lahar	KR	74	13/02/1998	Dua truk hanyut terbawa banjir	KR
48	22/05/1995	Masih hidup dikira tewas	KR	75	24/02/1998	Trauma Desember kelabu di Kali Boyong	KR
49	22/05/1995	Selamat setelah beberapa kali baca Yasin	Suara Merdeka	76	18/07/1998	Merapi ngracik bumbu buat meletus	KR
50	30/10/1995	Penambang andesit Merapi terdesak	KR	77	28/07/1998	Kali Putih tertimbun lahar	KR
51	03/11/1995	Hujan 3 jam, bisa banjir lahar	KR	78	08/08/1998	Jalan Tol lahar Merapi, berbahaya	KR
52	25/11/1995	Wedhus gembel besar akan muncul	KR	79	03/11/1998	Warga Merapi diminta waspada	Suara Merdeka
53	12/08/1996	Merapi tetap perlu diwaspadai	KR				

80	09/11/1999	Penambangan pasir di kawasan Merapi berbahaya	Kabar Kampus	105	24/05/2002	Perlu dibuat zonasi penambangan pasir	Kompas
81	10/01/2000	Rugi jutaan rupiah	Suara Merdeka	106	24/05/2002	Pemkab Sleman: pengoperasian 'bego' di lereng Merapi tanpa izin	Kompas
82	14/05/2000	Tolak pengkambinghitaman penambang	KR	107	01/06/2002	Pasir Merapi: diekspor ke Jepang	Kompas
83	13/06/2000	Pasir tetap mengalir	KR	108	17/06/2002	Ada permainan pengusaha-oknum pertambangan	KR
84	19/06/2000	Penambangan pasir besar dितertibkan	KR	109	22/06/2002	Merapi dan kawasan konservasi kita	KR
85	22/06/2000	Langsung dialog saja, tanpa orasi	KR	110	08/07/2002	Kondisi kawasan Merapi sakit	KR
86	09/08/2000	Ratusan truk berdatangan cari pasir: penambangan jalan terus	Suara Merdeka	111	15/08/2002	Gunung Merapi akan dijadikan taman nasional	Kompas
87	14/11/2000	Tebing longsor di Boyong, tanah gundul: curah hujan tinggi, lahar dingin mengancam	KR	112	02/09/2002	Tidak diizinkan penambangan di lereng Merapi	Kompas
88	12/01/2001	Penambangan di Kali Krasak dihentikan	KR	113	25/09/2002	Taman nasional Merapi segera dideklarasikan	Kompas
89	13/01/2001	Penambang pasir masih nekad	Jawa Pos	114	25/09/2002	Mendialogkan kembali Merapi kita	KR
90	19/01/2001	Diluar dugaan awas panas ke Bebung	KR				
91	27/01/2001	Kubah lava Merapi tak stabil rawan	KR	115	27/09/2002	Merapi, polemik taman nasional dan ideologi konservasi	KR
92	06/02/2001	Material Merapi masuk kandangmacan	KR				
93	29/03/2001	Banjir lahar mengancam	KR				
94	15/08/2001	Banyak penambang pasir tak berizin	KR	116	28/09/2002	Merapi sebagai sumber daya hidrogeologi	KR
95	15/08/2001	Merusak lingkungan dan bangunan air	Kompas				
96	03/09/2001	Bahayakan sabo, penggalian pasir Merapi	Kompas	117	11/10/2002	Tragedi bencana masih menghantui penduduk	KR
97	30/09/2001	Kerusakan lingkungan	?				
98	09/11/2001	Hujan deras, Merapi banjir lahar	KR	118	19/11/2002	Lahar dingin mulai mengancam	Kompas
99	17/11/2001	Kubah lava mengancam penambang pasir	Kompas	119	29/12/2002	Akibat aktivitas penambang liar	KR
100	08/12/2001	Kerusakan lingkungan lereng Merapi parah	Kompas				
101	08/02/2002	Penambang pasir diminta waspada	KR	120	10/01/2003	Perusda milik pemkab Magelang ikut jadi penambang	KR
102	23/05/2002	Bego menggaruk tanpa pandang bulu	Kompas	121	26/01/2003	Hujan deras di puncak Merapi, 4 pasir truk terjebak	Kompas
103	23/05/2002	Penambangan pasir belum selesai, sudah ada ide taman Merapi	Kompas	122	27/01/2003	Dam Kali Apu (Selo) akhirnya jebol	KR
104	23/05/2002	Terlambat ditangani, tambang pasir Merapi nyaris mustahil dihentikan	Kompas	123	28/01/2003	Banjir lahar dingin mengancam, Bupati minta penambang waspada	KR

124	28/01/2003	Ada 'back hoe' mogok di lahan Pak Carik	KR	144	22/03/2004	Jika nekat akan dieksekusi, Ibnu : stop menambang pasir di Minggir	KR
125	02/02/2003	Jutaan meter kubik material hanyut : "banjir lahar Merapi melalap cekdam"	KR	145	28/03/2004	Andaikan pasir dapat diganti nasi...	KR
126	03/02/2003	Penambang pasir panen	KR	146	11/04/2004	Menyusuri sungai memahami lingkungan	KR
127	03/02/2003	Bak air PDAM tertutup pasir	KR	147	01/05/2004	Warga Hargobinangun protes: penambangan pasir membahayakan	KR
128	04/02/2003	Warga umbulharjo kesulitan air	KR	148	mai-04	Petani akan menuntut ganti rugi: penambangan di Wedomartani matikan sumber air	KR
129	05/02/2003	Pengusaha penambang Merapi diperiksa	KR	149	22/05/2004	Warga lereng Merapi kesulitan air	KR
130	15/02/2003	Kasus penambangan pasir ilegal : Polres tunggu saksi ahli	KR	150	04/06/2004	Walhi DIY akan gugat menteri kehutanan	KR
131	15/02/2003	Banjir lahar dingin terus menerjang, dam Kali Apu makin mengkhawatirkan	KR	151	13/06/2004	Kru angkatan pasir gunung Merapi mogok	KR
132	19/02/2003	Penambang pasir kembali ke cekdam	KR	152	02/12/2004	Hujan mulai guyur puncak Merapi, masyarakat diminta waspada	KR
133	11/08/2003	Akibat pemakaian pupuk kimia, sumber air lereng Merapi tercemar Nitrat	KR	153	04/02/2005	Bukit Pusung Merapi longsor	KR
134	02/09/2003	Penambang di lereng Merapi dilarang	KR	154	20/04/2005	Terancam aktivitas penambang pasir tradisional	KR
135	11/09/2003	Taman Nasional Gunung Merapi	KR	155	23/04/2005	16 pelanggaran di areal penambangan	KR
136	21/09/2003	TNGM, hindari egoisme pengelolaan	KR	156	10/06/2005	Gempa Merapi meningkat, waspada	KR
137	12/10/2003	Penambang waspada tak repot : lahar Merapi telan 6 truk	KR	157	10/06/2005	Di dam Sumber Gendol, dua wanita penambang pasir tewas	KR
138	04/11/2003	Delta kali Blongkeng tak dimanfaatkan: lahar Merapi masuk pemukiman	KR	158	23/09/2005	Hujan, waspadai Merapi	KR
139	10/02/2004	Bekas pemukiman ditambang, massa demo : kantor penambangan dirusak dan dibakar	KR	159	05/01/2006	Penambangan pasir di Girikerto harus dikendalikan	KR
140	18/02/2004	Akibat penambangan pasir dengan backhoe, kemalang terancam bahaya tanah longsor	KR	160	11/01/2006	Timbulkan kekhawatiran terjadi bencana	KR
141	24/02/2004	Pembangunan jalan penambangan Merapi	KR	161	17/02/2006	Mendesak, perda penambangan pasir	KR
142	03/03/2004	Waspada lahar Merapi	KR	162	02/03/2006	Jangan ada backhoe di lereng Merapi	KR
143	03/03/2004	Mujahadah di lokasi penambangan	KR	163	21/03/2006	Penambang pasir Merapi masih beraktivitas	KR
				164	12/04/2006	Tewas keruntuhan galian pasir	KR

165	18/04/2006	Bertaruh nyawa, hadapi ancaman Gunung Merapi	KR	194	22/03/2007	Tebing kali Gendol ambrol	KR
166	19/04/2006	Hadapi bencana Merapi, dinkes siapkan fasilitas	KR	195	24/03/2007	Perlu retribusi penambangan pasir	KR
167	29/04/2006	Letusan Merapi akan membawa berkah	KR	196	29/03/2007	2 photos tentang penambangan pasir di Gendol	KR
168	mai-06	Photographies	KR	197	13/04/2007	Lahar dingin.	KR
169	10/05/2006	Penambang pasir masih nekat	KR	198	20/04/2007	Lahar Merapi kubur 2 truk	KR
170	19/07/2006	Penambang pasir di Woro kembali marak	KR	199	13/05/2007	Waspada, Merapi masih fase erupsi	KR
171	25/07/2006	Kunjungi Kaliadem lihat jejak awan panas	KR	200	07/08/2007	Samirin tewas tertimpa batu	KR
172	26/08/2006	Ketika lahar dingin mengancam	KR	201	07/11/2007	Penambang diimbau tidak menambang pada radius 6 km.	KR
173	22/11/2006	Pemantau lahar dirusak	KR	202	08/01/2008	Banjir lahar terjang kali Gendol - Hujan deras di Puncak Merapi	KR
174	23/11/2006	Penambang pasir mulai marak	KR	203	31/01/2008	Sopir panik, truk pasir terguling	KR
175	27/11/2006	Penambang pasir lari tunggan langgang	KR	204	31/01/2008	Penambangan pasir di Kali Woro harus dihentikan	KR
176	29/11/2006	Penambang pasir dapat berkah Merapi	KR	205	02/02/2008	Penambangan pasir panikn pencari rumput terjebak ; Lahar Merapi kubur truk	KR
177	04/12/2006	Banjir lahar dingin membawa berkah	KR	206	03/02/2008	Jika Hujan, lahar meluncur lagi	KR
178	05/12/2006	Banjir lahar kubur lokasi penambangan pasir	KR	207	16/03/2008	Lagi, truk terjebak lahar dingin	KR
179	16/12/2006	Material Gendol boleh dieksplorasi	KR	208	26/07/2008	Mengancam penambang tradisional	KR
180	23/12/2006	Terjang 5 truk, 2 jembatan rusak	KR	209	10/10/2008	Ancaman lahar dingin kembali muncul	KR
181	23/12/2006	Lahar Merapi hantam pipa PDAM	KR	210	25/10/2008	Penambang pasir mulai masuk Kaliadem	KR
182	24/12/2006	Batu sebesar bak truk hanyut	KR	211	26/10/2008	Mengenang dahsyatnya erupsi Merapi	KR
183	27/12/2006	Takut, aktivitas jalan terus	KR	212	04/11/2008	Truk terkjebak lahar dingin Merapi	KR
184	27/12/2006	Lahar dingin ancam 4 desa di Klaten	KR	213	04/11/2008	650 hektar lahan kritis di Sleman	Kompas
185	02/02/2007	Penambangan pasir di Bebeng dibuka	KR	214	14/11/2008	4 Kecamatan rawan luncuran lahar dingin	KR
186	09/02/2007	Jalur Jogja-Semarang dipalang truk	KR	215	26/11/2008	Dua penambang tewas tertimbun	KR
187	24/02/2007	Merapi ngamuk, penambang pasir panik	KR	216	28/11/2008	Areal tambang akan ditutup	Kompas
188	24/02/2007	15 truk terjebak lahar	KR	217	29/11/2008	Penambang tradisional sulit dihentikan	KR
189	25/02/2007	Penambang pasir berebut tempat strategis	KR	218	05/12/2008	Truk penambang pasir diperiksa	Kompas
190	27/02/2007	Risiko penambang Merapi kian besar	KR				
191	28/02/2007	Pasir Merapi makin diburu	KR				
192	13/03/2007	Pembkab tutup pintu terhadap orang luar	KR				
193	15/03/2007	Batu besar hadang penambang pasir	KR				

219	12/12/2008	Diduga ulah penambang pasir, dam penahan lahar dingin rusak	KR	242	26/01/2010	Ekosistem rusak, Yogya-Magelang terancam kurang air : TNGM dilarang ditambang	KR
220	12/02/2009	Penambang pasir kaliworo mulai panen	KR				
221	07/02/2009	Kawasan rawan bencana masih aman	KR	243	10/02/2010	DPRD Desak penutupan penambang galian C - Daerah tangkapan air rusak parah	KR
222	15/02/2009	Penambang asal Bantul tewas	KR				
223	26/02/2009	Penambang pasir waspada di Merapi	KR	244	11/02/2010	Setelah setahun ditutup, penambangan galian C di Cepogo dimulai lagi	KR
224	27/02/2009	Lahar dingin Merapi sapu kali Gendol	KR	245	01/03/2010	Longsor di Kali Gendol : 17 truk terjebak	KR
225	05/03/2009	Kandungan pasir Kali Apu menipis : warga menunggu banjir lahar dingin	KR	246	04/03/2010	Sejak tahun 2000, kemiren kuburan para penambang	KR
226	28/03/2009	Cepogo tidak untuk penambangan galian C	KR	247	05/03/2010	Penambangan galian C tak mungkin ditutup	KR
227	07/04/2009	Dua tahun dilalui truk pasir : jalur evakuasi Merapi rusak	KR	248	27/10/2010	Dam dikebut	Suara Merdeka
				249	28/10/2010	Kali Gendol	Harian Jogja
				250	28/10/2010	Sungai Gendol	KR
228	24/04/2009	39 truk terjebak di kali Gendol	KR	251	11/01/2010	Status awas Gunung Merapi, tak surutkan penambangan Kali Woro	KR
229	28/04/2009	Dam kali Kuning amankan banjir lahar	KR	252	11/02/2010	Abu vulkanik	Bernas Jogja
230	02/05/2009	Penambangan di kawasan rawan kembali menelan korban jiwa	Site P3BA	253	11/02/2010	Waspada banjir lahar	KR
				254	11/03/2010	Penambang pasir	Kompas
				255	11/04/2010	Lahar dingin	Bernas Jogja
231	22/06/2009	Penambang pasir liar akan ditutup	KR	256	11/04/2010	Lahar dingin menyerbu. Sebagian lahar masih panas	Bernas Jogja
232	07/10/2009	Temukan 120 lokasi sumber panas bumi	KR	257	11/04/2010	Lahar dingin	Radar Jogja
233	23/11/2009	Penambang harus waspada intensitas hujan meningkat	KR	258	11/04/2010	Waspada banjir lahar dingin	Radar Jogja
				259	11/04/2010	Umbul Wadon rusak, suplai air terganggu	Radar Jogja
234	10/12/2009	Problem penambangan pasir tak pernah berakhir	KR	260	11/04/2010	Lahar	Kompas
				261	11/04/2010	Pindah lokasi	Radar Jogja
235	12/12/2009	Pantau penambangan pasir : TNGM terjunkan 150 petugas	KR	262	11/04/2010	segera hentikan penambangan di aliran sungai Progo	Radar Jogja
236	21/12/2009	TNGM 'haram' bagi penambang	KR	263	11/04/2010	Lahar dingin	KR
237	28/12/2009	Merapi banjir lahar dingin	KR	264	11/04/2010	Lahar Dingin masuk Yogya	Republika
238	29/12/2009	Photographie	KR				
239	02/01/2010	Penambang lakukan kesepakatan	KR	265	11/05/2010	Akibat banjir lahar, Umbul Wadon tertutup lahar	Bernas Jogja
240	02/01/2010	Kali Woro banjir lahar Merapi	KR	266	11/05/2010	na	KR
241	25/01/2010	Di TNGM kapolda pasang larangan penambangan	KR	267	11/05/2010	Usai awan panas, lahar dingin menerjang	KR
				268	11/05/2010	Terseret banjir	KR
				269	11/05/2010	Sumber air PDAM tertimbun lahar dingin	KR

270	11/05/2010	Ikan mati diduga beracun. Antisipasi banjir, warga dirikan barak	KR	297	11/08/2010	Lahar; seperti bom waktu....	Kompas
271	11/05/2010	aliran lahar	KR	298	11/09/2010	Antisipasi Banjir. 1.160 karyawan Pemkot buat tanggul	KR
272	11/05/2010	Lahar dingin jadi tontonan	Bernas Jogja				
273	11/05/2010	Nekat	KR	299	11/09/2010	Waspada banjir lahar dingin	Bernas Jogja
274	11/05/2010	Warga kesulitan air bersih	Bernas Jogja	300	11/09/2010	Jebol	Bernas Jogja
275	11/05/2010	Lahar makin mengancam	Bernas Jogja	301	11/09/2010	Berkah Code	KR
276	11/05/2010	Penutupan kegiatan di sekitar Merapi. Picu maraknya penambangan ilegal di Progo	KR	302	11/09/2010	Saluran induk irigasi Kalibawang tertutup lahar. Saluran mati total, pengairan 7.300 H terganggu	KR
277	11/05/2010	Banjir lahar, petani ikan aman	KR				
278	11/06/2010	Warga sekitar Code mengungsi	KR	303	11/09/2010	Nekat menambang, tertimbun lahar dingin	KR
279	11/06/2010	Ganggu arus Lalin	KR	304	11/09/2010	Pasir kiriman Merapi jadi tanggul. PNS dikerahkan bangun bronjong	Bernas Jogja
280	11/06/2010	Warga Kali Code panik. Bangkai sapi terbawa banjir	Bernas Jogja	305	11/11/2010	Pengerukan. Material Merapi di Kali Kuning dibersihkan	Kompas
281	11/06/2010	Gotong royong	KR	306	11/11/2010	Gunakan alat berat. Cekdam Umbulmartani dibersihkan	Bernas Jogja
282	11/07/2010	Banjir lahar dingin di Code	Kompas	307	11/11/2010	Tumpukan material	KR
283	11/07/2010	Sri Sultan HB X, Code harus dikeruk	Bernas Jogja	308	11/11/2010	Pasir mulai ditambanga	KR
284	11/08/2010	Dangkal, Sungai Code kritis	Bernas Jogja	309	11/11/2010	DAM Kali Senowo luber, 3.000 warga Mangunsoko terancam	KR
285	11/08/2010	Lahar seperti bom waktu	Kompas	310	11/11/2010	Sungai Code mulai dikeruk. Lahar dingin belum merusak jembatan di DIY	KR
286	11/08/2010	Bermanfaat menyuburkan tanah. Dinpar sayangkan lahar dingin langsung ke laut	Bernas Jogja	311	11/11/2010	Jembatan kali Senowo hanyut	Bernas Jogja
287	11/08/2010	Waspada potensi hujan tinggi	Kompas	312	11/12/2010	Pipa PDAM diterjang banjir lahar. 4.000 pelanggan tak dapat air	KR
288	11/08/2010	Pantai selatan keruh	Kompas	313	11/12/2010	Bersihkan material vulkanik	Bernas Jogja
289	11/08/2010	Banjir lahar ancam warga. Kondisi muara belum terancam	Kompas	314	11/12/2010	Lahar rusak lahan dan fasum	Kompas
290	11/08/2010	Pemkot sediakan 58 penampungan. Warga Code siap mengungsi	KR	315	13/11/2010	Gotong royong keruk. Pemkot tambah alat berat	Kompas
291	11/08/2010	Lahar penuh kali Code. Petani gagal panen, harga sayur naik	Kompas	316	13/11/2010	Bermain di endapan Kali Code	Kompas
292	11/08/2010	Pasir Kali Code	Bernas Jogja	317	13/11/2010	Waspada endapan material Merapi	Kompas
293	11/08/2010	Waspada lahar dingin, material pasir, batu dan pohon memenuhi hampir seluruh badan Kali Code	Kompas	318	13/11/2010	Jembatan kali Pabelan ditutup	KR
294	11/08/2010	Waspada potensi hujan tinggi	Kompas	319	13/11/2010	Mengisi liburan	KR
295	11/08/2010	Pantai selatan keruh	Kompas				
296	11/08/2010	Banjir lahar dingin jadi tontonan	Bernas Jogja				

320	13/11/2010	Kali Code dikeruk hingga Maret	Bernas Jogja	347	22/11/2010	Antara Merapi, Petit Opak, Gendol dan Opak	KR
				348	22/11/2010	Jadi perhatian	KR
321	13/11/2010	Sungai Progo bawa material vulkanik. Biaya pengolahan air bersih dua kali lipat	KR	349	23/11/2010	10 hektare sawah rusak diterjang lahar dingin	KR
322	14/11/2010	Endapan lahar ke seluruh sungai	Bernas Jogja	350	23/11/2010	Dua warga terseret lahar dingin	Bernas Jogja
323	14/11/2010	Lumpur kembali genangi Code	Bernas Jogja	351	24/11/2010	Merapi eruptions. 'Yogya is safe', other areas face floods	The Jakarta Post
324	15/11/2010	Lewati lahar dingin	Bernas Jogja				
325	15/11/2010	Ketinggian Air Code menurun	Bernas Jogja	352	24/11/2010	Hujan deras di lereng Merapi. Code meluap, banjir lahar di Magelang	KR
326	15/11/2010	Lahar kembali mengalir ke Code	Bernas Jogja				
327	15/11/2010	Operasi Code tanggap Merapi dibentuk	Bernas Jogja	353	24/11/2010	Selokan Mataram dan Selokan Van Der Wijk. Sebulan mati total tertutup material Merapi	KR
328	15/11/2010	Jalur evakuasi Paten-Sengi tak bisa dilewati	KR				
329	15/11/2010	Mencari pasir	KR	354	25/11/2010	Banjir lahar dingin Merapi, warga enggan mengungsi. Air Kali Code masuk rumah	KR
330	15/11/2010	Pasir langka akibat bencana Gunung Merapi, sejumlah proyek di Solo juga terancam molor	KR	355	25/11/2010	Kali Code meluap	Metro Jogja
				356	25/11/2010	Empat bendungan dangkal	Metro Jogja
331	16/11/2010	Endapan pasir	KR				
332	16/11/2010	DAM jebol	KR	357	25/11/2010	Diterjang banjir lahar dingin Merapi. Sejumlah jembatan rusak, akses jalan putus	KR
333	16/11/2010	Dam jadi penahan	Bernas Jogja				
334	16/11/2010	Meluap	Bernas Jogja				
335	18/11/2010	BNPB seriusi Kali Code	Bernas Jogja	358	26/11/2010	Sungai berhulu Merapi dikeruk	KR
			Jogja	359	26/11/2010	Sifting Sludge	The Jakarta Post
336	18/11/2010	Kepala BNPB cek Sabo Dam	Bernas Jogja				
337	18/11/2010	Berangkat Salat	Bernas Jogja	360	26/11/2010	Dewan desak Pemkot buat DIM. Sebulan, Pengerukan sedimen Code	KR
338	18/11/2010	Meluap	KR				
				361	26/11/2010	Mewaspada banjir lahar dingin Merapi	KR
339	18/11/2010	Dipasang, empat sensor. Alat peringatan dini banjir lahar dingin beri waktu 30 menit	Kompas				
				362	27/11/2010	Diterjang banjir lahar dingin. Pekarangan longsor, jalan 2 desa terputus	KR
340	18/11/2010	Pasca erupsi. Aliran lahar dingin Merapi menyimpang	Kompas				
341	19/11/2010	Nekat	KR	363	27/11/2010	Hindari dampak berat material lava harus dikosongkan	KR
342	19/11/2010	Daya tarik	KR				
343	19/11/2010	Banjir lahar dingin	Bernas Jogja	364	27/11/2010	Alat berak keruk lahar	Bernas Jogja
344	22/11/2010	Melebar	KR	365	29/11/2010	Banjir lahar, Dusun Padasan kritis	KR
				366	29/11/2010	Harus waspada	KR
345	22/11/2010	Erupsi menurun, warga cemas banjir lahar. Radius 300 meter dari sungai dikosongkan	KR	367	30/11/2010	Selokan Mataram tersumbat	Bernas Jogja
				368	30/11/2010	Banjir Code bak tsunami	Bernas Jogja
346	22/11/2010	Kebanyakan truk dari luar DIY. Penambangan pasir di Dusun Sempu Marak	Bernas Jogja	369	30/11/2010	Pengerukan Code terus dilakukan	KR

370	30/11/2010	Warga Code mengungsi, Jembatan Sardjito retak. Lahar dingin rendam ratusan rumah	KR	392	12/02/2010	Penelitian. Kajian menantang bagi Dam Sabo Merapi	Kompas
				393	12/02/2010	Material terus mengalir	Kompas
				394	12/02/2010	Tertimbun pasir	KR
371	30/11/2010	Mount Merapi. Resident scramble to safety as Yogyakarta hit by river of mud	The Jakarta Post	395	12/02/2010	Waspadaai gangguan pencernaan. Jernihkan sumur warga, BLH siapkan tawas	KR
372	30/11/2010	Diterjang banjir lahar, tiga jenazah hanyut	KR				
373	12/01/2010	Nekat	KR	396	12/02/2010	Peralatan terbatas. Warga bantaran Code kesulitan bersihkan lumpur	KR
374	12/01/2010	Semakin dangkal	Bernas Jogja-Metro Jogja	397	12/02/2010	Diterjang lahar, jembatan putus, rumah tertimbun	KR
375	12/01/2010	Antisipasi meluapnya lahar dingin. Aliran Sungai Boyong kini mulai ditata	Bernas Jogja	398	12/04/2010	Banjir lahar makin sering terjadi	Kompas
376	12/01/2010	Lahar dingin meluap. Aliran air jembatan Bulus putus	Bernas Jogja	399	12/04/2010	Lahar dingin menghanyutkan keuntungan pertanian	Kompas
377	12/01/2010	Lahar dingin terjang permukiman. Sapi diungsikan, warga tidur di jalan	KR	400	12/04/2010	Jembatan Pandeyan terpaksa ditutup. Lahar dingin kembali terjang rumah warga	KR
378	12/01/2010	Pagar jebol	KR	401	12/05/2010	Kurangi sedimen	KR
379	12/01/2010	Banjir susulan masih mengancam, rumah warga Code retak	KR	402	12/05/2010	Gravitasi menopang laju lahar dingin	KR
				403	12/05/2010	Banjir lahar dingin	KR
380	12/01/2010	Puncak hujan diprediksikan Januari, masyarakat diimbau waspadaai banjir susulan	KR	404	12/06/2010	Banjir lahar terjang Kaliworo	KR
				405	12/06/2010	Jalan Jogja-Muntilan putus, lalu-lintas macet 5 jam	Bernas Jogja
381	12/01/2010	Pemkot siapkan SK Tamggap	KR				
382	12/01/2010	Mengamankan barang	KR	406	12/06/2010	Lalu lintas Yogya-Magelang sempat ditutup. Banjir lahar meluap hingga jalan raya	KR
383	12/01/2010	Delapan jembatan aman	Bernas Jogja				
384	12/02/2010	Tujuh hektare lahan padi di Bantul rusak	Bernas Jogja				
385	12/02/2010	Warga Code perbaiki tanggul	Bernas Jogja	407	12/06/2010	Setelah menunggu 12 jam, Truk yang hanyut dievakuasi	KR
386	12/02/2010	Code masuki status darurat.	Kompas	408	12/08/2010	Banjir di Kota 1.631 rumah terendam. Pemprov tawarkan hunian sementara	KR
387	12/02/2010	Tanggap darurat diberlakukan	Bernas Jogja				
388	12/02/2010	Lahar dingin, Jembatan Pabelan ditutup	Bernas Jogja	409	12/08/2010	Banjir melanda 13 daerah	Kompas
389	12/02/2010	Selamatkan perabotan	Bernas Jogja	410	12/08/2010	Lahar dingin kian mengancam	Kompas
390	12/02/2010	Perbaiki bantaran Kali Code. Butuh dana Rp 4 Miliar	KR	411	12/08/2010	Sisa lahar dingin	Kompas
				412	12/08/2010	Lahar dingin sapu Kali Pabelan	Bernas Jogja
391	12/02/2010	Warga gotong royong sambung pipa	KR	413	12/08/2010	TPU diterjang banjir lahar Merapi. Puluhan mayat hilang	KR

414	12/08/2010	Hemat anggaran dan waktu. Normalisasi Intake Kalibawang perlu diswastakan	KR	433	01/06/2011	Akibat diterjang lahar dingin. Jalur evakuasi Jarakah longsor	KR
415	12/08/2010	Warga Songgobumi Boyolali terisolir	KR	434	01/07/2011	Tertimbun lahar	KR
416	12/09/2010	Perbaikan 3 jembatan butuh Rp 1,1 miliar	KR	435	01/07/2011	2 pompa air rusak diterjang lahar dingin. 4.000 konsumen PDAM terganggu	KR
417	12/09/2010	Mulai ada warga terserang penyakit. Perlu penataan ulang Kali Code	KR	436	01/07/2011	Banjir lahar dingin	KR
418	12/09/2010	Warga Code menanti bantuan pompa	KR	437	01/07/2011	Rusak diterjang lahar dingin. Normalisasi Kali Woro butuh dana Rp 1 M	KR
419	12/09/2010	Ternacam banjir lahar dingin. 24 makam di TPU Sudimoro dipindah	KR	438	01/08/2011	Tunggu alur lahan dingin terbentuk. Tunda pembangunan di lereng Merapi	KR
420	12/09/2010	Banjir lahar dingin 'putuskan' jalan Yogya-Magelang	KR	439	01/08/2011	Ditemukan di Kali Opak, ular Piton tertimbun material Merapi	KR
421	23/12/2010	Terangi aliran Kali Putih. Akan dipasang lampu 2 ribu watt	KR	440	01/08/2011	Mayat ditemukan di Kali Putih	KR
422	01/01/2011	Lahar dingin terjang 3 jembatan	Radar Jogja	441	01/08/2011	Waspada banjir lahar di puncak musim hujan	KR
423	01/02/2011	Ruang penjagaan tertimbun material Merapi. Mapolsek Cangkringan diterjang lahar	KR	442	01/09/2011	Banjir lahar dingin Kali Gendol. 4 truk terjebak, 1 rumah tertimbun	KR
424	01/03/2011	250 bronjong lahar dingin ambrol	KR	443	01/09/2011	Terjebak lahar Merapi	KR
425	01/03/2011	Warga Dusun Talun tinggalkan rumah. Banjir lahar dingin Kali Senowo mengancam	KR	444	01/10/2011	Warga Desa Gondosuli Muntlan. Korban lahar dingin siap direlokasi	KR
426	01/04/2011	Banjir lahar, Code meluap, Mapolsek jebol. Jalur Yogya-Magelang putus	KR	445	01/10/2011	Diterjang lahar dingin, Jembatan Suroteleng rusak	KR
427	01/04/2011	Jalur	KR	446	01/10/2011	Pengerukan pasir Code, untungkan warga	KR
428	01/04/2011	Makam Tionghoa terancam banjir	KR	447	01/10/2011	Banjir meluas, lahar dingin cari alur baru. Lagi, Yogya-Magelang putus	KR
429	01/05/2011	Bergaya ala Spiderman. Prihatin selamat saat banjir lahar dingin	KR	448	01/11/2011	Cukup vital bagi kebutuhan air. Warga minta Umbulwadon segera diperbaiki	KR
430	01/05/2011	Banjir lahar dingin. 6 jembatan di Cangkringan ambrol	KR	449	01/11/2011	Desa Sirahan lumpuh, 1.033 KK mengungsi	KR
431	01/05/2011	Jalur Yogya-Magelang dibuka. Banjir lahar dingin hantam puluhan rumah	KR	450	01/11/2011	Kayu Merapi, berkah bagi nelayan	KR
432	01/06/2011	Di sepanjang Kali Putih. Banjir lahar dingin masih mengancam	KR	451	01/11/2011	Tanggul Kali Gendol jebol. 3 rumah hanyut, 13 terendam	KR
				452	01/11/2011	Magelang-Yogya masih lumpuh. Jalur dialihkan, puluhan truk tertahan	KR

453	01/11/2011	Banjir lahar dingin, puluhan jembatan Boyolali-Magelang putus. Ribuan warga terisolir	KR	470	14/1/2011	Langkah darurat dipasang jembatan Bailey	KR
454	01/11/2011	Dam Utama jebol	KR	471	14/1/2011	Banjir Kali Gendol dan Kali Opak. Perlanjar arus, pintu air dibuka tiap hari	KR
455	01/11/2011	Hanyut terbawa banjir lahar dingin. Batang pisang selamatkan Marina dan Zaki	KR	472	14/1/2011	Jalan desa terbelah	KR
456	01/12/2011	Akibat banjir lahar dingin Merapi. 4187 warga mengungsi	KR	473	15/1/2011	Kurangi timbunan material, Dam Sabo perlu dijebol	KR
457	01/12/2011	Tebing setinggi 60 meter jebol. Lahar dingin terjang ratusan hektare lahan pertanian	KR	474	16/1/2011	Diterjang banjir lahar Kali Pabelan. Jembatan Tlatar Sawangan putus	KR
458	01/12/2011	Dilarang menambang dekat bangunan vital	KR	475	16/1/2011	Jumoyo berduka	KR
459	01/12/2011	Material vulkanik masih menumpuk di tepi jalan. Jalur Yogya-Magelang belum normal	KR	476	16/1/2011	Ganggu lalu lintas Yogya-Magelang. Lagi, air Kali Putih tutup jalan	KR
460	01/12/2011	Duduk di genteng	KR	477	16/1/2011	Banjir lahar dingin meluas. Kedung Sungai Progo tertutup	KR
461	13/1/2011	Lahar dingin masih mengancam. Warga diminta tingkatkan kewaspadaan	KR	478	17/1/2011	Tak bisa dilalui	KR
462	13/1/2011	2 rumah nyaris hanyut. Lahar dingin terjang Sukorini	KR	479	17/1/2011	JK minta jembatan darurat dibangun. Banjir lahar dingin terus menerjang	KR
463	13/1/2011	Kota Semarang diterjang angin kencang. Hentikan, pengerukan percepat lahar dingin	KR	480	17/1/2011	Bangunan sekolah rusak, KBM terganggu. Lagi, Cekdam Kali Putih ambrol	KR
464	13/1/2011	40 persen material Merapi ke arah timur. Jalan Yogya-Klaten terancam tertutup	KR	481	17/1/2011	Dampak banjir lahar Kali Pabelan. Lahan pertanian terancam kekeringan	KR
465	13/1/2011	Jalur Yogya-Magelang normal. Kendaraan antre, padat merayap	KR	482	18/1/2011	Batu besar 'nangkring' di ruas jalan. Jalur Yogya-Magelang ditutup lagi	KR
466	14/1/2011	Dishub siapkan jalur alternatif. Antisipasi putusnya jalur Klaten-Yogya	KR	483	18/1/2011	Cegah lahar dingin terjang permukiman. 15 titik butuh talud bronjong	KR
467	14/1/2011	Jalur alternatif Magelang-Yogya. Petunjuk jalan masih kurang	KR	484	18/1/2011	Banjir terjadi lagi	KR
468	14/1/2011	EWS diluncurkan. Tingkatkan waspada banjir Code	KR	485	18/1/2011	Sabo DAM runtuh	KR
469	14/1/2011	Bersihkan puing-puing	KR	486	19/1/2011	Banjir lahar Kali Putih. Jalan Yogya-Magelang tergerus	KR
				487	19/1/2011	Pasca banjir lahar	KR
				488	19/1/2011	Kompak bersatu	KR
				489	20/1/2011	Pantau Code	KR
				490	20/1/2011	Lahan pertanian masih 8 Pedukuhan terendam	KR
				491	20/1/2011	Jika Sabo dijebol, daya rusak tinggi. Kali Opak tak dilengkapi cekdam Sepadan	KR
				492	20/1/2011	DPUP buat jembatan darurat	KR
				493	20/1/2011	Diterjang lahar dingin. Irigasi tak berfungsi	KR
				494	20/1/2011	Warga trauma lahar dingin	KR

495	20/1/2011	Program early recovery. Perbaiki jembatan ambrol dan rusak	KR	516	28/1/2011	Terhalang lahar dingin	KR
496	21/1/2011	Jembatan putus, satu tewas	KR	517	29/1/2011	Dihantui banjir lahar, tetap kerja	KR
497	21/1/2011	Situs Kali Woro akan dipindah. Hindari dampak banjir lahar dingin	KR	518	29/1/2010	Korban banjir lahar di Prumpung Muntilan. Banyak rumah terkubur pasir 2-3 meter	KR
498	21/1/2011	Dam Borangan sejajar dasar Kali Woro	KR	519	31/1/2011	Potongan Dam	KR
499	21/1/2011	Atasi dampak bencana alam. Ketersediaan pangan harus diperhatikan	KR	520	31/1/2011	Jembatan balley difungsikan	KR
500	22/1/2011	Gerusan ruas jalan Yogya-Magelang melebar. Lahar dingin hanyutkan jembatan darurat	KR	521	31/1/2011	Akan dipasang telemetri. Pantau curah hujan kawasan Merapi	KR
501	22/1/2011	Diterjang banjir lahar dingin. Jembatan Ngepos mengkhawatirkan	KR	522	02/01/2011	Bendungan irigasi terganggu lahar. Produksi beras diprediksi turun	KR
502	23/1/2011	Meluap lagi	KR	523	02/04/2011	Kali Putih Magelang banjir lagi. Longsor di Boyolali, 700 jiwa terisolasi	KR
503	23/1/2011	Banjir lahar dingin di Kali Putih menggila. Jalan Magelang kian tergerus	KR	524	02/05/2011	Jalur Yogya-Magelang Km 23 putus lagi. Banjir lahar dingin tewaskan warga	KR
504	24/1/2011	Lagi, lahar dingin Merapi terjang Kali Putih. Tumpukan material jebol, warga terjebak	KR	525	02/05/2011	Jembatan putus	KR
505	24/1/2011	Berharap banjir lahar segera berakhir	KR	526	02/05/2011	Warga lereng Merapi. Tolak pembangunan Sabo Dam	KR
506	25/1/2011	3 Kecamatan terancam luapan material. Kali Opak tak punya kantong lahar	KR	527	02/06/2011	Sedang arung jeram, dua tewas terbawa lahar dingin. Dam jebol, tower seluler roboh	KR
507	25/1/2011	71 hektare lahan sawah rusak	KR	528	02/07/2011	Membentuk tempuran	KR
508	25/1/2011	Banjir lahar dingin Merapi. Muncul tiga alur sungai	KR	529	02/08/2011	Rawan longsor	KR
509	25/1/2011	Banjir lahar dingin masih mengancam. Selokan Mataram belum bisa terairi	KR	530	02/08/2011	Warga Padasan kurangi endapan. Ketebalan pasir saluran irigasi 1,5 m	KR
510	25/1/2011	Diterjang banjir lahar. Desa Sirahan 'terkubur', 3 mobil hanyut	KR	531	02/09/2011	Jalan ambles	KR
511	26/1/2011	Banjir lahar dingin gerus jembatan Kebon Agung. Dam Kali Apu hancur total	KR	532	02/10/2011	Jembatan Tlogoputri dibuat permanen. Sapu lubang di Jalan Ringroad Barat	KR
512	27/1/2011	Dam Kali Apu	KR	533	02/10/2011	Nekat	KR
513	28/1/2011	Evakuasi di Seloboro	KR	534	02/11/2011	Agar ribuan warga tidak terisolir. Dam konsolidasi diminta segera diperbaiki	KR
514	28/1/2011	Ditawarkan alih profesi. 14 hektare kolam akan tertimbun lahar	KR	535	02/11/2011	Terancam longsor	KR
515	28/1/2011	Bupati minta Selokan Mataram dibuka	KR	536	13/2/2011	Candi lumbung terancam runtuh. Lahar Merapi usik situs bersejarah	KR
				537	13/2/2011	Untuk menahan muntahan material. Perlu dibangun Sabo Dam baru	KR
				538	16/2/2011	Kali Gendol banjir lahar. Koramil tertimbun, mobil terseret	KR

539	17/2/2011	Sebagian besar jalur rusak parah. Lima desa ajukan bantuan Rp 1,5 miliar	KR	562	03/11/2011	Untuk talud	KR
540	17/2/2011	Timbunan material	KR	563	03/12/2011	Banjir lahar dingin sampai Kalasan. Sebagian sisi Dam Jabang Bayi retak	KR
541	17/2/2011	Usai banjir lahar dingin. Danau biru muncul di Kali Apu	KR	564	03/12/2011	Jalur rawan lahar	KR
542	18/2/2011	Dam Plunyon tertimbun longsor tebing. Maret, curah hujan di lereng Merapi tinggi	KR	565	13/3/2011	Banjir Kali Putih genangi permukiman warga	KR
543	22/2/2011	Material tanggul	KR	566	14/3/2011	Aliran baru	KR
544	22/2/2011	Ancaman banjir lahar masih menghantui. Rumah parah, 80 warga Karangasem mengungsi	KR	567	15/3/2011	Jambon teraliri lahar	KR
545	23/2/2011	Meski banjir lahar tidak besar. Jalur alternatif tak bisa dilalui	KR	568	15/3/2011	Ludes diterjang banjir lahar dingin. Pasar Jumoyo dijadikan rest area	KR
546	27/2/2011	Material yang turun baru sepertiga. Banjir lahar dingin masih mengancam	KR	569	17/3/2011	Banjir lahar dingin masih mengancam. Warga Muntilan cemas	KR
547	28/2/2011	147,31 Ha tanaman padi puso	KR	570	18/3/2011	Relawan SKB kekurangan HT	KR
548	03/01/2011	Banjir lahar dingin	KR	571	18/3/2011	Meski dilanda bencana. Realisasi PBB Kabupaten Magelang capai 82%	KR
549	03/01/2011	Banjir, Jalan Yogya-Magelang sempat ditutup. Tiga jalur di Kali Gendol putus	KR	572	19/3/2011	Tanggul di Kali Putih jebol. Areal tanaman padi diterjang lahar	KR
550	03/01/2011	Lahar Kali Pabelan	KR	573	20/3/2011	Aliran banjir lahar	KR
551	03/01/2011	Jalan rusak	KR	574	20/3/2011	Belasan rumah terendam, ratusan mengungsi. Lahar mulai lintasi Prambanan	KR
552	03/03/2011	Jalan putus segera diperbaiki	KR	575	20/3/2011	Akibat banjir lahar	KR
553	03/03/2011	Minggu depan, jembatan panggung dioperasikan	KR	576	21/3/2011	Banjir lahar di Gendol, belasan motor terkubur. Letupan sekunder mengancam	KR
554	03/06/2011	Jalan Raya Yogya-Magelang kembali normal	KR	577	22/3/2011	Banjir lahar dingin jebol tanggul. Material Gendol masih bahaya	KR
555	03/06/2011	Jalan Yogya-Magelang sempat tertutup lagi. Lahar kian dekati Prambanan	KR	578	22/3/2011	Lahar Kali Gendol	KR
556	03/07/2011	Meluber ke perkampungan	KR	579	22/3/2011	Kian meluas	KR
557	03/08/2011	Lahar dingin	KR	580	22/3/2011	Dampak banjir lahar dingin. 41 rumah tak bisa dihuni	KR
558	03/08/2011	Diterjang lahar, tanggul Kali Putih jebol	KR	581	22/3/2011	Kampung terendam lahar	KR
559	03/09/2011	Jalan ambles di Brebes bertambah parah. Banjir, Yogya-Magelang sempat ditutup	KR	582	23/3/2011	Lahar melintasi Prambanan	KR
560	03/10/2011	Pentaludan dan normalisasi sungai. Amankan jalur alternatif	KR	583	23/3/2011	Banjir lahar dingin, ratusan warga Cangkringan diungsikan. Hujan pasir di sekitar Gendol	KR
561	03/11/2011	Lahar dingin, 2 km dari Candi Prambanan	KR	584	23/3/2011	Code meluap lagi, 71 rumah rusak. Ancaman banjir sampai sebulan ke depan	KR
				585	23/3/2011	Akibat tanggul jebol	KR

586	23/3/2011	Dusun Tambakan	KR				
587	23/3/2011	Warga Kampung	KR	609	04/01/2011	Banjir terbesar di Sungai Progo. Rusak lahan pertanian dan kolam ikan	KR
588	23/3/2011	Lahan pertanian	KR				
589	23/3/2011	Banjir lahar dingin di Banjarharjo. Puluhan hektare lahan pertanian tertutup pasir	KR	610	04/01/2011	Lahar dingin tenggelamkan lahan pertanian. Ratusan warga kehilangan mata pencaharian	KR
590	24/3/2011	90 KK kesulitan air bersih. Sumur mengandung belerang	KR	611	04/02/2011	Pasca terputusnya Jembatan Pabelan. Jalur Purworejo makin padat	KR
591	24/3/2011	Dusun Tambakan tak layak huni	KR	612	04/02/2011	Terbawa banjir lahar dingin. Jalan penghubung Balerante-Sidorejo ambrol	KR
592	24/3/2011	Disinyalir picu banjir. Warga Kliwang usir 'Backhoe'	KR				
593	24/3/2011	Tebing terkikis	KR	613	04/02/2011	Jembatan Kali Pabelan sebelah utara aman. Wisman ke Borobudur dijemput	KR
594	24/3/2011	Buka tutup	KR				
595	25/3/2011	Akibat banjir lahar di Magelang. 3.452 orang mengungsi di 11 lokasi	KR	614	04/03/2011	Banjir lahar di Kali Pabelan. 109 rumah hanyut, 334 rusak berat	KR
596	25/3/2011	Meluap lagi	KR	615	04/04/2011	Warga diminta waspada. Cekdam pertama Kali Woro jebol	KR
597	25/3/2011	Korban banjir lahar dingin tunggu relawan. Rumah terendam belum dibersihkan	KR	616	04/04/2011	Pembangunan jembatan Pabelan Muntilan. Dikebut, akhir Mei selesai	KR
598	26/3/2011	Penanganan tiap wilayah beda. Tanggap darurat Code diperpanjang	KR	617	04/04/2011	Produksi padi menurun. Kebutuhan air tak tercukupi	KR
599	26/3/2011	Tanggap darurat diperpanjang. Banjir, 195 rumah rusak	KR	618	04/04/2011	Kali Pabelan Banjir, jembatan ditutup. Longsor di Bantul, 1 tewas	KR
600	28/3/2011	Terkait ancaman banjir Poldad DIY operasikan Kontijensi	KR	619	04/05/2011	Cegah banjir lahar dingin. Warga bangun tanggul	KR
601	28/3/2011	Menimbun lahan warga	KR				
602	28/3/2011	Hujan disertai lahar dingin. Akibat jembatan Sidosari ambrol	KR	620	04/05/2011	Arus lalu lintas Yogya-Semarang dialihkan. Jembatan Pabelan selesai 4 bulan	KR
603	29/3/2011	Warga di bantaran sungai diminta waspada. Ancaman lahar dingin semakin meluas	KR	621	04/06/2011	Dam konsolidasi Kecamatan Dukun. Bangunan ambrol makin lebar	KR
604	29/3/2011	Kondisi Dusun Guling	KR				
605	31/3/2011	Jembatan Pabelan	KR	622	04/06/2011	Dampak runtuhnya Jembatan Pabelan. 90% bus malam tidak beroperasi	KR
606	31/3/2011	Banjir lahar, ratusan warga Ngemplak mengungsi. Jembatan Kali Pabelan putus	KR	623	04/06/2011	Pembangunan kembali jembatan yang rusak. Sultan: tunggu ancaman banjir selesai	KR
607	31/3/2011	Meluas hingga Prambanan. 77 rumah terancam lahar dingin	KR	624	04/06/2011	Bronjong hanya pengaman sementara	KR
608	04/01/2011	Jembatan Pabelan	KR				

625	04/07/2011	Normalisasi Kali Boyong mendesak. 6 Dusun di Candibinangun terancam banjir	KR	634	13/4/2011	Amankan jembatan. Penambangan harus dikendalikan	KR
626	04/07/2011	Kena gelontoran Kali Opak dan Kali Kuning. Pasir Merapi timbun lahan di Piyungan	KR	635	15/4/2011	Banjir Kali Gendol	KR
627	04/07/2011	Material baru turun sebagian. Lahar dingin masih mengancam	KR	636	15/4/2011	Pengerukan saluran Kalibawang berhenti. Tanaman terancam kekeringan	KR
628	04/07/2011	Ratusan KK terancam terendam. Tanggul anak Sungai Kuning jebol	KR	637	16/4/2011	Lahar dingin rusak 10 Ha lahan pertanian	KR
629	04/08/2011	Lahar dingin sampai Prambanan. Pondasi jembatan Pandansimping tergerus	KR	638	18/4/2011	Bendungan jebol tergerus lahar dingin. Tanaman pangan terancam kekeringan	KR
630	04/08/2011	Jembatan darurat	KR	639	19/4/2011	Warga bersihkan lahar dingin	KR
631	04/11/2011	Bermain cekungan	KR	640	27/4/2011	Mendekati musim kemarau, pipa Umbul Wadon rusak	KR
632	04/11/2011	Tumpukan sedimen perlu diwaspadai. Banjir lahar dingin masih mengancam	KR	641	29/4/2011	Melintasi jalur lahar	KR
633	04/11/2011	Material vulkanik kubur ratusan hektare lahan	KR				

Annexe A.4 – Liste des vidéos de lahars filmés en 2010-2011 (vidéos > 1 min) chargées sur YouTube, actualisée début octobre 2012.

On sera sensible au nombre de fois que ces différentes vidéos ont été visionnées. La plupart du temps, le chiffre ne dépasse pas les 4000 vues, à la différence notable de la vidéo n°8 qui totalise 21322 vues en octobre 2012. À la différence des autres enregistrements, il s'agit d'une vidéo qui montre clairement la rupture d'un pont, avec ses effets spectaculaires.

Il existe un grand nombre de vidéos de lahars sur internet, auquel le lecteur intéressé peut accéder très facilement. Il a été choisi ici de ne mentionner que les vidéos réalisées en 2010-2011 dont la durée excède 1 min. La liste a été réalisée régulièrement tout au long du premier semestre 2011, à l'aide de mots clés (lahar, Merapi, banjir) et du système de navigation établi par YouTube entre vidéos de même nature. La liste a été révisée en avril 2012, mais elle ne prétend pas à l'exhaustivité, et peut avoir oublié quelques enregistrements. L'usage du téléphone portable rend parfois la qualité très mauvaise ; toutefois, cette pratique est très courante, les vidéos de lahars pouvant s'échanger sur les réseaux sociaux. On remarquera d'ailleurs, dans presque toutes les vidéos, et notamment les numéros 4, 8 et 12, la présence de plusieurs dizaines de personnes amassées le long des berges. Cette pratique est particulièrement dangereuse, la thèse a insisté sur l'aspect morphogène des lahars en montrant que les corridors dans lesquels ils s'écoulent ne sont pas fixes, mais s'ajustent sans cesse à la dynamique du flux. Les personnes situées au bord de ces corridors sont donc exposés aux débordements que le spectacle auquel ils assistent peut produire.

No	Titre	URL	Nombre de vues début octobre 2012	Rivière	Auteur	Durée de la vidéo	Date de l'événement	Commentaire
1	Detik detik datangnya lahar dingin di kali Trising	http://www.youtube.com/watch?v=fBfw6xeg6Sw	6958	Trising	emnzie	7'09	01/12/2010	Vidéo prise au <i>dusun</i> Candi tengah. Première pulsation riche en débris organiques. Deuxième pulsation plus énergique. Mauvaise résolution.
2	Banjir lahar dingin terbesar di Kali Code	http://www.youtube.com/watch?v=u4k2aEk16zo&feature=related	7680	Boyong- Code	fariszsolmus 02746411199	5'43	29-nov-10	Écoulement hyperconcentré dont les pulsations sont bien visibles. Forte teneur en débris organiques (troncs d'arbre), charge en suspension abondante et vitesse rapide. Mauvaise définition du lahar, caractérisé comme une coulée de lave froide (sic). Vocabulaire sensationnel "terbesar" (le plus gros lahar).

3	Kali Putih Banjir Lahar Dingin (Cold Lava Flood on Putih River)	http://www.youtube.com/watch?v=27SkTHUyco&feature=related	7596	Putih	supermanisdeady1	1'02	05-déc-10	Vidéo prise à Salam (Magelang). Même commentaire fautif sur la définition des lahars (lave froide). Ecoulement hyperconcentré, à fort débit. Hauteur importante (juste sous l'arcade du pont).
4	Banjir lahar dingin kali Kuning jembatan Padasan runtuh	http://www.youtube.com/watch?v=qyFTkXRPM5o	5907	Kuning	lintaryogi	5'41	04-nov-10	Vidéo prise au niveau du pont reliant Pakem, Padasan, Pakembinangun, Kedung, Wukirsari (Cangkringan). Impressionnante vidéo d'un écoulement hyperconcentré à fort débit, avec abondance des débris végétaux flottés et forte teneur en matériaux en suspension. Grande énergie. Destruction du pont.
5	Banjir lahar di sungai Boyong 5 11 10	http://www.youtube.com/watch?v=OAoFwk7oX2w&feature=related	7811	Boyong	pramudiyanto	10'02	05-nov-10	Qualité assez mauvaise. Vidéo prise à Rejodani, Sariharjo, Ngaglik (Sleman). Ecoulement rapide, régulier, hyperconcentré. Débit abondant, avec débordement dans les canaux d'irrigation. Quelques débris végétaux transportés ; lahar remobilisant les premiers dépôts de l'éruption.
6	Banjir lahar di sungai Boyong 5 11 11 (2)	http://www.youtube.com/watch?v=zObY4ri8nZU&feature=related	2059	Boyong	pramudiyanto	1'14	05-nov-10	Mauvaise qualité, dont l'intérêt principal reste le zoom effectué sur le flux, qui en montre bien la dynamique turbulente, chahutée de remous, de vagues à contrecourant, rapide.
7	Banjir lahar dingin kali Kuning	http://www.youtube.com/watch?v=j0zEosLu58Q&feature=related	1768	Kuning	MrEmrino	1'02	?	Vidéo de bonne qualité montrant une route bâtie sur un barrage, tous deux envahis par l'écoulement du lahar. Le blocage du matériel en amont du barrage favorise de tels débordements. On remarque des dépôts de blocs, de sable et un grand nombre de débris végétaux traduisant une certaine fréquence d'occurrence des lahars. Date non référencée.

8	Detik detik patahnya jembatan srowol akibat terjangan lahar dingin merapi tanggal 1 desember 2010	http://www.youtube.com/watch?v=K7oaJk5uGpo&feature=related	21322	Ladon	om20020	1'58	01-déc-10	Lahar de faible intensité. On sera attentif : (1) à l'écoulement hyperconcentré riche en débris végétaux, (2) à la puissance érosive du courant, et à son caractère morphogène, (3) à l'attitude des spectateurs: situés près du pont, ils guettent et filment le lahar. Intéressante conduite sur la perception du lahar, qui devient, outre l'aléa et la ressource, le grand spectacle à diffusion médiatique. Effet d'annonce.
9	4 Jembatan Lagi Dirontokkan Lahar Dingin Merapi	http://www.youtube.com/watch?v=UPIZFglF9lg&feature=related	3209	Putih	cixass12	1,46	01-déc-10	Enregistrement télévisé d'un reportage d'information. Il semblerait, compte tenu de la date, qu'il s'agisse éventuellement du lahar cité précédemment. Information primordiale pour lister les dégâts occasionnés par les lahars. On remarquera l'attitude des spectateurs, conduite à risque (foule sur les berges).
10	Lahar dingin DAM Kali Lamat	http://www.youtube.com/watch?v=U-6KuBPmCuk	1014	Lamat	MsPodz	2'50	05/12/2010	Présence de débris (1'30) qui suggère peut-être la présence d'un front plus puissant que le reste de l'écoulement. Energie importante, et gros plans appréciables sur le flux permettant d'en saisir la dynamique: vagues, contre-courants, très forte concentration... La vidéo est prise depuis la partie haute méridionale du barrage, où se massent les curieux (voir à 0'35). Là encore, conduite à risque évidente, car l'écoulement est très énergétique. Très bon exemple de l'inutilité des barrages en cas de gros lahars, après une éruption ayant rempli les fonds de vallées.
11	Banjir lahar dingin kali krasak ds mlesen rabu sore pukul 16.00-18.30 wib 8 desember 2010	http://www.youtube.com/watch?v=kHdgScW-QH4&feature=related	794	Krasak	MrDeddy41	0'46	08/12/2010	Vidéo rapide, prise au téléphone portable, effet de mode (?) et mauvaise qualité d'image. A remarquer : écoulement hyperconcentré, pas de blocs, vallée à versants bas, donc risque d'étalement du lahar. Localisation précise: site de Pondokrejo.

12	Lahar dingin di kali Putih	http://www.youtube.com/watch?v=GMBvOgdRhvw&feature=related	2460	Putih	rizki755	3'52	?	Aucune référence de l'événement, ni aucune localisation précise. Vidéo ajoutée le 15 décembre, il s'agit soit d'un lahar antérieur, soit d'un épisode original. Malgré tout, aucun lahar ne semble visible ici (qualité médiocre), mais la vidéo permet néanmoins de bien voir les effets de foule, les blocages, le rôle des autorités.
13	Lahar Merapi Xputih 3GP	http://www.youtube.com/watch?v=-fOZ2lJ6Upo&feature=related	1021	Putih	ganispuspo	1'54	?	Lahar de novembre 2010, survenu à Sirahan, qui a d'ailleurs été complètement dévasté par des épisodes successifs de lahars. Vidéo sans grand intérêt si ce n'est celui de montrer le faible écoulement.
14	Banjir lahar dingin Kali Code 3GP	http://www.youtube.com/watch?v=8D2hcY6S8k	4443	Boyong-Code	wahanaifcation	4'54	29/11/2010	Enregistrement à 17h30, RW 7 Ratmakan Yogyakarta. Même événement que vidéo n°2. Ecoulement hyperconcentré, vagues et gonflements. Intéressant car montre comment le lahar coule à côté des maisons, directement exposées.
15	Banjir lahar dingin Kali Code 29 Nov 2010	http://www.youtube.com/watch?v=_woiVnotn6o&feature=related	<i>Lien mort</i>	Boyong-Code	andrykobein	15'23	29/11/2010	Excellente vidéo. Qualité moyenne, mais longue durée, et surtout précisions intéressantes sur la nature de l'écoulement et ses paramètres. A 17h30, le lahar est passé à hauteur de l'hôtel Garuda Malioboro, à hauteur des berges proches de la Jl Mataram. Vague frontale (mais pas de front srt. s.), accompagnée d'une forte concentration en débris ; écoulement hyperconcentré à pulsations marquées (1'50). On appréciera la rapide évolution de la hauteur du flux dans les premières secondes de la vidéo par rapport aux berges.
16	Video amatir banjir lahar dingin kali Code	http://www.youtube.com/watch?v=mmCe3MPY7sE&feature=related	3498	Boyong-Code	firstariani	3'15	29/11/2010	Ecoulement hyperconcentré du 29 novembre, mais difficile à situer. Rien de particulier.
17	Lahar dingin kali Putih Srumbung Magelang	http://www.youtube.com/watch?v=gwJMS3BvU2g&feature=related	9530	Putih	andisetyaji	1'06	nov-10	Vidéo prouvant l'occurrence de lahar début novembre 2010. Remarquer le barrage inondé par le flux.

18	Lahar dingin kali Putih warga nangis	http://www.youtube.com/watch?v=vgNRiEe1Kqs	2094	Putih	anakgunung80	1'32	mars-11	Ecoulement hyperconcentré. Prise de vue irrégulière, bonne qualité. Effet spectaculaire des habitants catastrophés.
19	Effondrement du pont de Tlatar	http://www.youtube.com/watch?v=OZmDacMfJrs	9895	Trising	santos78fti	5'02	janv-11	Détail de l'effondrement du pont.
20	Lahar dingin Merapi	http://www.youtube.com/watch?v=CjTISBFsOJc	3374	Putih	mazko999	1'29	nov-10	Lahar dans la Putih à Dukun. Qualité mauvaise, mais filmé par rapport à un pont/barrage qui permet d'apprécier la manière dont le lahar s'écoule.
21	Merapi 2010 (lahar dingin boyong)	http://www.youtube.com/watch?v=JBEx38xQ4rg	1610	Boyong	mbahrie	2'00	déc-10	Gros plans sur l'écoulement dont la haute concentration est bien visible. Pas très rapide, ni profond, mais très concentré. Transport du matériel par roulage.
22	Lahar dingin Merapi 2010	http://www.youtube.com/watch?v=HuVIAezlpd4	958	?	nice3dd1	1'01	nov-10	Ecoulement hyperconcentré dans une large vallée (Putih / Gendol) ?
23	Lahar dingin Merapi 3	http://www.youtube.com/watch?v=6BzVVM428DE	266	Putih	notoprojo	1'25	22/01/2011	Lahar de la Putih (22 janvier 2011). Qualité médiocre, pas de plan fixe.
24	Cold lava flood in the river district Magelang	http://www.youtube.com/watch?v=VvUKXWFin8o	407	?	kulipasarwedi	9'27	janv-11	Plans multiples d'un lahar (vraisemblablement filmé dans la Putih) de type écoulement torrentiel à hyperconcentré. (Banjir plus que lahar?)
25	Banjir watu neng kali Senowo	http://www.youtube.com/watch?v=eVhwKnJCEPE	171	Senowo	krepojogja79	1'35	?	Lahar dans la Senowo et exemple du transport de gros matériaux.
26	selatan tlatar by yuanaariye@yahoo.com...2	http://www.youtube.com/watch?v=OkOdNodSzMU	4080	Trising	yuanaari	5'58	15/01/2011	Vue de l'effondrement du pont de Tlatar depuis l'amont .
27	Lahar dingin Merapi	http://www.youtube.com/watch?v=7g5TOuh78fk	3683	?	dijakiee	7'53	?	Vue des pulsations d'un lahar. Filmé assez longtemps sur plan fixe, mais aucune information de localisation précise. Change d'angle de vue après 3'30. Repérer la manière dont gonfle le débit entre 1'43 et 3'11.

28	Banjir lahar dingin	http://www.youtube.com/watch?v=DfPMoUBUPBE	1048	Gendol	galihnur12	11'26	19/03/2011	Lahar du 19 mars 2011 filmé à Bronggang. Remarquer l'attitude dangereuse des pelleteuses qui continuent de creuser alors que le lahar arrive. Ecoulement torrentiel à hyperconcentré, intensité faible. Mauvaise qualité de la vidéo, pas de plan fixe.
29	Banjir lahar dingin kali Gendol	http://www.youtube.com/watch?v=_wUwjyQxuWE	1432	Gendol	MsDsim	2'04	févr-11	Front d'un lahar de grande taille à Manggung (Gendol). L'auteur de la vidéo ne reste pas, et ne peut donc filmer l'intégralité du lahar. Image de mauvaise qualité. Ecoulement très rapide et très concentré.
30	Lahar Merapi	http://www.youtube.com/watch?v=vSKQ7ESomxA	154	Krasak	supomohafish	1'06	?	Ecoulement hyperconcentré dans la Krasak. Trop bref et pas d'angle de vue fixe.

Annexe A.5 – Détail des débits de lahars mesurés d’après enregistrement vidéo

Talus distal de la Gendol, Plumbon.

Temps (min)	Débit d'après analyse vidéo (m ³ s ⁻¹)		
	28/02/2011	14/03/2011	21/03/2011
0	0,4	0,4	0,4
1	0,4	0,4	0,4
5	253,8	12	86,4
10	240	52,5	128
15	231	131,2	100
20	312	289,8	96
25	315	405	160
30	540	405	225
35	220	105	139,5
40	125	40	141
45	80	34	50,4
50	72	10	47

Annexe A.6 – Exemple d'évaluation de la vitesse de surface d'un lahar à partir d'une vidéo

Site de Plumbon, Gendol. Extrait d'une vidéo prise le 21 mars 2011. Le pont mesure 6 m de largeur. La vitesse de déplacement des éléments transportés permet d'en déduire la vitesse de surface du flux : ici, le bloc flotté met à peine 1 s pour franchir la largeur du pont. La vitesse de surface du lahar peut donc être estimée à environ 5 à 6 m/s.



Annexes B

Gestion de crise

Annexe B.1 – Exemple de flyer distribué aux riverains de la Boyong et de la Code, Kabar Sungai, 2011

« Waspada lahar hujan » : attention aux lahars pluviaux.

Exemple d'une mitigation encadrée par des ONG locales, ce document a été distribué dès janvier 2011 aux riverains des rivières Boyong et Code, puis en mars aux riverains de la Gendol et de la Opak. Le flyer prodigue une information concise et précise sur les lahars (on remarquera que le terme ambigu de banjir n'est pas utilisé – voir la discussion partie 2) et sensibilisent les habitants aux procédures d'alerte. On n'oubliera que l'on se situe sur le talus distal du volcan, qui n'est pas habitué à subir les aléas naturels ni à évacuer en cas d'urgence (chap. 4). Ce document est souvent accompagné de réunions organisées à l'échelle d'un quartier pour expliquer ce qu'il faut prévoir comme équipement d'urgence, comment évacuer, quels sont les numéros à joindre, comment se tenir informé.

WASPADA LAHAR Hujan

Apa Sih... "Lahar Hujan"????

Aliran air yang bercampur dengan pasir, lumpur, batu, kayu dan lainnya. Dengan komposisi seperti itu, maka kerapatan campuran material tersebut lebih padat dibanding air jernih. Maka, aliran lahar hujan bisa menimbulkan erosi dan kerusakan luar biasa.

Penyebab Lahar Hujan adalah....

Berawal dari meletusnya Gunung Merapi, yang menyebabkan penumpukan material di hulu sungai. Apabila di kawasan hulu sungai (puncak Merapi), terjadi hujan deras selama dua jam atau hujan terus-menerus selama lebih dari dua jam, akan mengakibatkan banjir lahar hujan.

Tanda Lahar Hujan :

- Terdengar suara gemuruh (benturan batu)
- Air sungai kental (seperti adonan semen-pasir)
- Warna air sungai pekat, coklat tua
- Aliran air sungai membawa batu, pasir, lumpur, kayu
- Air sungai bergelombang besar

Prosedur Evakuasi

- a. Jangan panik, tetap tenang dan waspada.
- b. Perlengkapan yang akan dibawa sudah dimasukkan dalam tas dan siap untuk dibawa.
- c. Memperhatikan dan mematuhi perintah Koordinator Evakuasi.
- d. Mengikuti jalur evakuasi yang telah ditentukan (berupa tanda panah).
- e. Menuju titik aman dengan cepat namun tanpa tergesa-gesa.

Ketentuan Jalur Evakuasi

- a. Tidak di pinggir sungai.
- b. Tidak melewati jembatan.
- c. Tidak searah atau berlawanan arah dengan air sungai.
- d. Mengarah ke tempat yang lebih tinggi
- e. Dilwati arus searah (tidak 2 arah)

Peta spasial Warga

- a. Peta Jalur Evakuasi
- b. Peta wilayah (rumah – posko transit)
- c. Data kelompok warga berdasar umur
- d. Data kelompok warga berdasar kesehatan
- e. Data alat transportasi

Yang Harus Dihindari

- Jangan merasa panik
- Jangan membuat panik
- Mengeluh karena harus evakuasi atau pindah sementara berulang kali
- Berdiri, berjalan, atau berlari di sepanjang pinggir sungai, jembatan atau tikungan
- Merasa jagoan/menang sendiri/sok pahlawan
- Mudah percaya pada gosip, kabar burung atau informasi yang tak jelas sumbernya

Yang Harus Dilakukan

- Siapkan panitia mandiri yang bertugas untuk:
- Ronda sungai malam hari dan jam-jam rawan
- Memimpin evakuasi warga secara mandiri
- Mendirikan posko transit (pengungsian)
- Menjaga keamanan lingkungan
- Selalu berkomunikasi dan koordinasi dengan Komandan Evakuasi masing-masing
- Patuhi setiap perintah dan aturan evakuasi

SEKBER PPA DIY
SEKRETARIAT BERSAMA PERHIMPUNAN PECINTA ALAM DIY

Qu'est-ce qu'un «lahar pluvial» ?

Il s'agit d'eau mélangée à du sable, de la boue, des cailloux, des branches d'arbres et autres débris. Sa consistance est plus solide que celle de l'eau, ainsi les lahars pluviaux sont-ils cause d'érosion accélérée et de dommages très importants.

Les causes d'un lahar pluvial sont...

Depuis la fin de l'éruption, l'amont des rivières est comblé de matériaux volcaniques instables. En cas de pluie intense pendant deux heures, ou de pluie modérée durant plus de deux heures, ces matériaux sont emportés par le ruissellement et forment un lahar pluvial.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

- Eviter de paniquer.
- Ne pas causer de panique.
- Ne pas hésiter à évacuer ou se déplacer de manière anarchique.
- Ne pas circuler sur les berges des rivières et sur les ponts.
- Ne pas tenter de bravoure inutile, faire preuve d'égoïsme ou jouer les héros.
- Ne pas prêter l'oreille aux rumeurs et à toute information dont la source n'est pas vérifiée.

CE QU'IL FAUT FAIRE

- Être prêt à agir de manière indépendante et responsable :
 - Surveiller la rivière en fin de journée et en période de pluie.
 - Evacuer les abords des rivières.
 - Etablir des postes de surveillance et d'information (posko).
 - Assurer la sécurité.
- Prendre contact avec les responsables locaux de l'évacuation (responsables des villages, des posko...) et se tenir informé.
- Obéir à l'ordre d'évacuer et en respecter la procédure.

UN LAHAR SE MANIFESTE PAR :

- Un grondement sourd (provoqué par le transport des blocs).
- La rivière prend une texture épaisse (évoquant un aspect pâteux).
- La couleur de la rivière s'assombrit, évoque celle du chocolat noir.
- La rivière transporte des blocs, du sable, de la boue et des branches d'arbres.
- La rivière s'élargit, et l'écoulement prend une forme ondulé.

PROCEDURES D'EVACUATION

- a. Ne pas paniquer, garder son calme et rester vigilant.
- b. Les biens à protéger sont déjà emballés et prêts à être emportés.
- c. Ecouter les responsables locaux des évacuations et leur obéir.
- d. Suivre les chemins d'évacuation matérialisés par des flèches.
- e. Atteindre les points de sécurité rapidement mais sans précipitation.

LES CHEMINS D'EVACUATION

- a. Ne suivent jamais les berges des rivières
- b. N'empruntent aucun pont.
- c. Ne vont pas dans la même direction que le lahar, ni dans la direction opposée.
- d. Se dirigent toujours vers un point plus élevé.
- e. Ne multiplient pas les directions.

A CONSULTER :

- a. Carte des chemins d'évacuation
- b. Carte des posko
- c. Données démographiques
- d. Données sanitaires
- e. Données sur les moyens de transport

Annexe B.2 – Un site internet d'information sur les lahars : Jalin Merapi

Une diffusion large par l'entremise des réseaux sociaux : les utilisateurs partagent l'information

Un moyen d'information en temps réel sur le Merapi, notamment concernant les lahars.

Une information actualisée régulièrement

S.M.S. envoyés par les utilisateurs du réseau au coordinateur

Informations générales sur la région du Merapi :
Warga bicara : «micro-trottoir» dans les villages
P. Bencana : gestion des risques
Ekonomi lokal : situation économique
Lingkungan : environnement
Budaya : culture et arts locaux
Serba-serbi : articles divers
Pariwisata : tourisme
Kliping : revue de presse

Informations diverses :
caméras du Merapi
couverture médiatique
circulation routière

Articles sur l'actualité du Merapi et de Jalin Merapi
ici : communication sur une grave sécheresse à Deles (Klaten - cf. chap. 6 IV.2.2)
en juillet 2012.

Connexion aux caméras de surveillance installées par le district de Magelang sur la quatre-voies Yogyakarta-Semarang

Fil d'information et de discussion en continu par échange de tweets.

Connexion aux caméras de surveillance du BPPTK et aux sismogrammes en temps réel.
Qualité moyenne et temps de chargement long (env. 5 min)

Podcasts radios

Boîte à discussion et livre d'or, concernant le Merapi ou d'autres régions.
Ici :
Mention d'un problème d'adduction d'eau potable à Tlogowatu, sur le flanc est dans la région de Boyolali.
Mention d'un film réalisé sur la crise environnementale du volcan de boue qui ensevelit, depuis 2006, le sud-est de l'agglomération de Surabaya (Java Est)

The screenshot shows the Jalin Merapi website interface. At the top, there's a navigation bar with links like 'Tentang Jalin Merapi', 'Peta Jaringan', 'Kontak', and 'Peta Situs'. A prominent phone number '08180 438 9000' is displayed. The main content area is divided into several sections: 'SMS 08180 438 9000' showing a list of messages; 'JALIN MERAPI jalinmerapi' with a list of tweets; 'CCTV dan Seismogram Merapi' displaying a table of camera and seismic data; 'Temukan kami di Facebook' with a Facebook link; 'INFO MERAPI' with a list of topics like 'Warga Bicara', 'Pembangunan Bencana', etc.; 'REFERENSI' with links to 'Webcam Merapi', 'Liputan Media', and 'Info Lalu Lintas'; and 'SHOUTBOX' for user comments. There are also sections for 'Podcasts radios' and 'Boîte à discussion'. The bottom of the page shows social media integration with '1 Online', 'Tulisan Terkini', 'Tweet 2,213', and 'Suka 258'.

Annexes C

Granulométrie des dépôts de lahars

Annexe C.1 – Échelles granulométriques : diamètre des grains (mm), équivalences en échelle ϕ et classifications (Wentworth et AFNOR)

Diamètre des particules		
mm	μm	ϕ
> 256		< -8
256		-8
200		-7,6
64		-6
32		-5,00
20		-4,32
16		-4
4		-2
3,36		-1,75
2,83		-1,5
2,38		-1,25
2		-1
1,68		-0,75
1,41		-0,5
1,19		-0,25
1		0
0,84		0,25
0,71		0,5
0,59		0,75
0,5	500	1
0,42	420	1,25
0,35	350	1,5
0,3	300	1,75
0,25	250	2
0,21	210	2,25
0,2	200	2,32
0,177	177	2,5
0,149	149	2,75
0,125	125	3
0,105	105	3,25
0,088	88	3,5
0,074	74	3,75
0,0625	62,5	4
0,053	53	4,25
0,05	50	4,32
0,044	44	4,5
0,037	37	4,75
0,031	31	5
0,02	20	5,64
0,0156	15,6	6
0,0078	7,8	7
0,0039	3,9	8
0,002	2	9
0,00098	0,98	10
0,00049	0,49	11
0,00024	0,24	12
0,00012	0,12	13

Echelles granulométriques	
Wentworth	AFNOR
Blocs (< - 8 ϕ)	Blocs (< -7,6 ϕ)
Gros cailloux (-5 à -8 ϕ)	Cailloux ou galets (-4,32 à -7,6 ϕ)
Cailloux (-2 à -5 ϕ)	
Graviers (-1 à -2 ϕ)	Graviers (-1 à -4,32 ϕ)
Sable très grossier (0 à -1 ϕ)	Sables grossiers (1 à -1 ϕ)
Sable grossier (1 à 0 ϕ)	
Sable moyen (2 à 1 ϕ)	Sables moyens (2,32 à 1 ϕ)
Sable fin (3 à 2 ϕ)	
Sable très fin (4 à 3 ϕ)	Sables fins (4,32 à 2,32 ϕ)
Limons grossiers (5 à 4 ϕ)	
Limons moyens (6 à 5 ϕ)	Limons grossiers (5,64 à 4,32 ϕ)
Limons fins (7 à 6 ϕ)	
Limons très fins (8 à 7 ϕ)	Limons fins (9 à 5,64 ϕ)
Argiles (> 9 ϕ)	
	Argiles (> 9 ϕ)

Annexe C.2 – Analyses granulométriques de l'unité de sédimentologie de l'Université Gadjah Mada (Yogyakarta)

Les tableaux suivants renseignent la granulométrie des échantillons de 5 kg récupérés pour l'analyse de la texture des lithofaciès (gamme granulométrique depuis 0,016 mm jusqu'à 90,51 mm).



LABORATORIUM HIDROLOGI DAN KUALITAS AIR
FAKULTAS GEOGRAFI
UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA, 6492340, 6492337

Nom : 7/LT.FGE/01/11

HASIL PENGUJIAN RESULT TEST – SENOWO PROXIMAL

D: diamètre des particules

Nom d'identification								S 1	S 2	S 3
Date d'échantillonnage								26/01/11	26/01/11	26/01/11
90.51	mm	>	D	>	64.00	mm	(%)	32.82	0.00	39.18
64.00	mm	>	D	>	45.00	mm	(%)	10.62	0.00	7.98
45.00	mm	>	D	>	32.00	mm	(%)	4.87	10.3497	20.49
32.00	mm	>	D	>	23.00	mm	(%)	6.50	6.80	7.04
23.00	mm	>	D	>	16.00	mm	(%)	2.47	1.72	6.31
16.00	mm	>	D	>	11.20	mm	(%)	2.79	3.46	3.43
11.20	mm	>	D	>	8.00	mm	(%)	1.97	1.75	1.77
8.00	mm	>	D	>	5.60	mm	(%)	2.49	3.63	1.25
5.60	mm	>	D	>	4.00	mm	(%)	0.17	4.14	0.84
4.00	mm	>	D	>	2.80	mm	(%)	2.59	6.14	0.86
2.80	mm	>	D	>	2.00	mm	(%)	3.94	9.34	0.74
2.00	mm	>	D	>	1.40	mm	(%)	3.26	7.78	0.63
1.40	mm	>	D	>	0.85	mm	(%)	5.09	10.09	1.03
0.85	mm	>	D	>	0.60	mm	(%)	3.78	6.85	0.93
0.60	mm	>	D	>	0.425	mm	(%)	4.11	7.07	1.32
0.425	mm	>	D	>	0.300	mm	(%)	3.00	4.88	1.19
0.300	mm	>	D	>	0.212	mm	(%)	2.49	4.20	1.08
0.212	mm	>	D	>	0.150	mm	(%)	2.07	2.81	1.05
0.150	mm	>	D	>	0.106	mm	(%)	1.66	2.55	0.96
0.106	mm	>	D	>	0.075	mm	(%)	0.90	1.27	0.56
0.075	mm	>	D	>	0.053	mm	(%)	0.87	1.74	0.56
0.053	mm	>	D	>	0.032	mm	(%)	1.37	3.24	0.71
0.032	mm	>	D	>	0.016	mm	(%)	0.15	0.19	0.08
Berat Jenis								2.86	2.84	2.87
Berat Volume								(g/cc) 2.62	2.45	2.63

RESULT TEST – BOYONG MEDIAL

Nom d'identification							K 2	K 3
Date d'échantillonnage							17/02/2011	17/02/2011
90.51	mm	>	D	>	64.00	mm (%)	0.00	0.00
64.00	mm	>	D	>	45.00	mm (%)	42.09	0.00
45.00	mm	>	D	>	32.00	mm (%)	10.98	0.00
32.00	mm	>	D	>	23.00	mm (%)	2.28	0.00
23.00	mm	>	D	>	16.00	mm (%)	1.89	0.00
16.00	mm	>	D	>	11.20	mm (%)	4.88	0.00
11.20	mm	>	D	>	8.00	mm (%)	2.78	1.20
8.00	mm	>	D	>	5.60	mm (%)	2.69	2.12
5.60	mm	>	D	>	4.00	mm (%)	2.10	2.71
4.00	mm	>	D	>	2.80	mm (%)	2.32	4.91
2.80	mm	>	D	>	2.00	mm (%)	2.71	5.44
2.00	mm	>	D	>	1.40	mm (%)	1.74	5.53
1.40	mm	>	D	>	0.85	mm (%)	3.51	9.73
0.85	mm	>	D	>	0.60	mm (%)	2.90	8.16
0.60	mm	>	D	>	0.425	mm (%)	3.33	10.11
0.425	mm	>	D	>	0.300	mm (%)	2.74	7.73
0.300	mm	>	D	>	0.212	mm (%)	2.44	7.31
0.212	mm	>	D	>	0.150	mm (%)	2.24	7.17
0.150	mm	>	D	>	0.106	mm (%)	1.98	6.92
0.106	mm	>	D	>	0.075	mm (%)	1.07	4.33
0.075	mm	>	D	>	0.053	mm (%)	1.02	3.09
0.053	mm	>	D	>	0.032	mm (%)	2.14	13.17
0.032	mm	>	D	>	0.016	mm (%)	0.18	0.38
Berat Jenis							2.87	2.79
Berat Volume							(g/cc) 2.52	2.51

RESULT TEST – GENDOL MEDIAL

Nom d'identification							B 1	B 2
Date d'échantillonnage							23/03/2011	23/03/2011
90.51	mm	>	D	>	64.00	mm (%)	0.00	0.00
64.00	mm	>	D	>	45.00	mm (%)	0.00	28.80
45.00	mm	>	D	>	32.00	mm (%)	0.00	5.78
32.00	mm	>	D	>	23.00	mm (%)	0.00	6.72
23.00	mm	>	D	>	16.00	mm (%)	5.63	6.25
16.00	mm	>	D	>	11.20	mm (%)	5.08	3.38
11.20	mm	>	D	>	8.00	mm (%)	2.07	3.56
8.00	mm	>	D	>	5.60	mm (%)	3.92	2.96
5.60	mm	>	D	>	4.00	mm (%)	4.47	2.83
4.00	mm	>	D	>	2.80	mm (%)	5.22	2.91
2.80	mm	>	D	>	2.00	mm (%)	7.52	3.65
2.00	mm	>	D	>	1.40	mm (%)	5.41	2.77
1.40	mm	>	D	>	0.85	mm (%)	8.71	3.87
0.85	mm	>	D	>	0.60	mm (%)	7.52	3.45
0.60	mm	>	D	>	0.425	mm (%)	9.32	4.24
0.425	mm	>	D	>	0.300	mm (%)	8.13	3.48
0.300	mm	>	D	>	0.212	mm (%)	6.49	3.05
0.212	mm	>	D	>	0.150	mm (%)	5.90	3.25
0.150	mm	>	D	>	0.106	mm (%)	4.75	2.98
0.106	mm	>	D	>	0.075	mm (%)	3.03	2.23
0.075	mm	>	D	>	0.053	mm (%)	1.32	2.42
0.053	mm	>	D	>	0.032	mm (%)	4.98	1.37
0.032	mm	>	D	>	0.016	mm (%)	0.55	0.05
Berat Jenis							2.871	2.744
Berat Volume							(g/cc) 2.33	2.51

RESULT TEST – OPAK ET PUTIH DISTALES

Nom d'identification							Op 1	Sirahan
Date d'échantillonnage							14/04/2011	12/05/2011
90.51	mm	>	D	>	64.00	mm	(%)	0.00
64.00	mm	>	D	>	45.00	mm	(%)	0.00
45.00	mm	>	D	>	32.00	mm	(%)	0.00
32.00	mm	>	D	>	23.00	mm	(%)	0.00
23.00	mm	>	D	>	16.00	mm	(%)	0.00
16.00	mm	>	D	>	11.20	mm	(%)	0.00
11.20	mm	>	D	>	8.00	mm	(%)	0.11
8.00	mm	>	D	>	5.60	mm	(%)	0.09
5.60	mm	>	D	>	4.00	mm	(%)	0.09
4.00	mm	>	D	>	2.80	mm	(%)	0.28
2.80	mm	>	D	>	2.00	mm	(%)	1.82
2.00	mm	>	D	>	1.40	mm	(%)	2.22
1.40	mm	>	D	>	0.85	mm	(%)	8.76
0.85	mm	>	D	>	0.60	mm	(%)	9.28
0.60	mm	>	D	>	0.425	mm	(%)	14.09
0.425	mm	>	D	>	0.300	mm	(%)	11.94
0.300	mm	>	D	>	0.212	mm	(%)	7.53
0.212	mm	>	D	>	0.150	mm	(%)	8.33
0.150	mm	>	D	>	0.106	mm	(%)	6.56
0.106	mm	>	D	>	0.075	mm	(%)	3.84
0.075	mm	>	D	>	0.053	mm	(%)	4.07
0.053	mm	>	D	>	0.032	mm	(%)	20.86
0.032	mm	>	D	>	0.016	mm	(%)	0.13
Berat Jenis							2.61	2.72
Berat Volume							(g/cc) 1.57	1.50

Yogyakarta, 11 April 2011

Prof. Dr. H. Suratman, M.Sc.

Harjito, S.T., M.Si.

Catatan :

- 1) Hasil pengujian ini hanya berlaku untuk contoh yang diuji. These test result are only valid for the tested samples
- 2) Sertifikat ini tidak boleh diperbanyak tanpa ijin dari Manajer Teknik. The certificate shall not be reproduced (copied) without the written permission of the laboratory Technical Manager

Hasil uji yang dicetak miring belum termasuk dalam lingkup akreditasi KAN. The italic numbers are not the

Annexe C.3 – Distributions granulométriques des échantillons de fraction fine (< 2 mm)

Tableaux donnés en ordre granulométrique décroissant (des particules grossières aux fines) pour le calcul des paramètres en échelle φ . Les graphiques dans le texte et à l'annexe C.4 sont eux donnés par ordre granulométrique croissant (des fines aux particules grossières) pour une lecture plus logique.

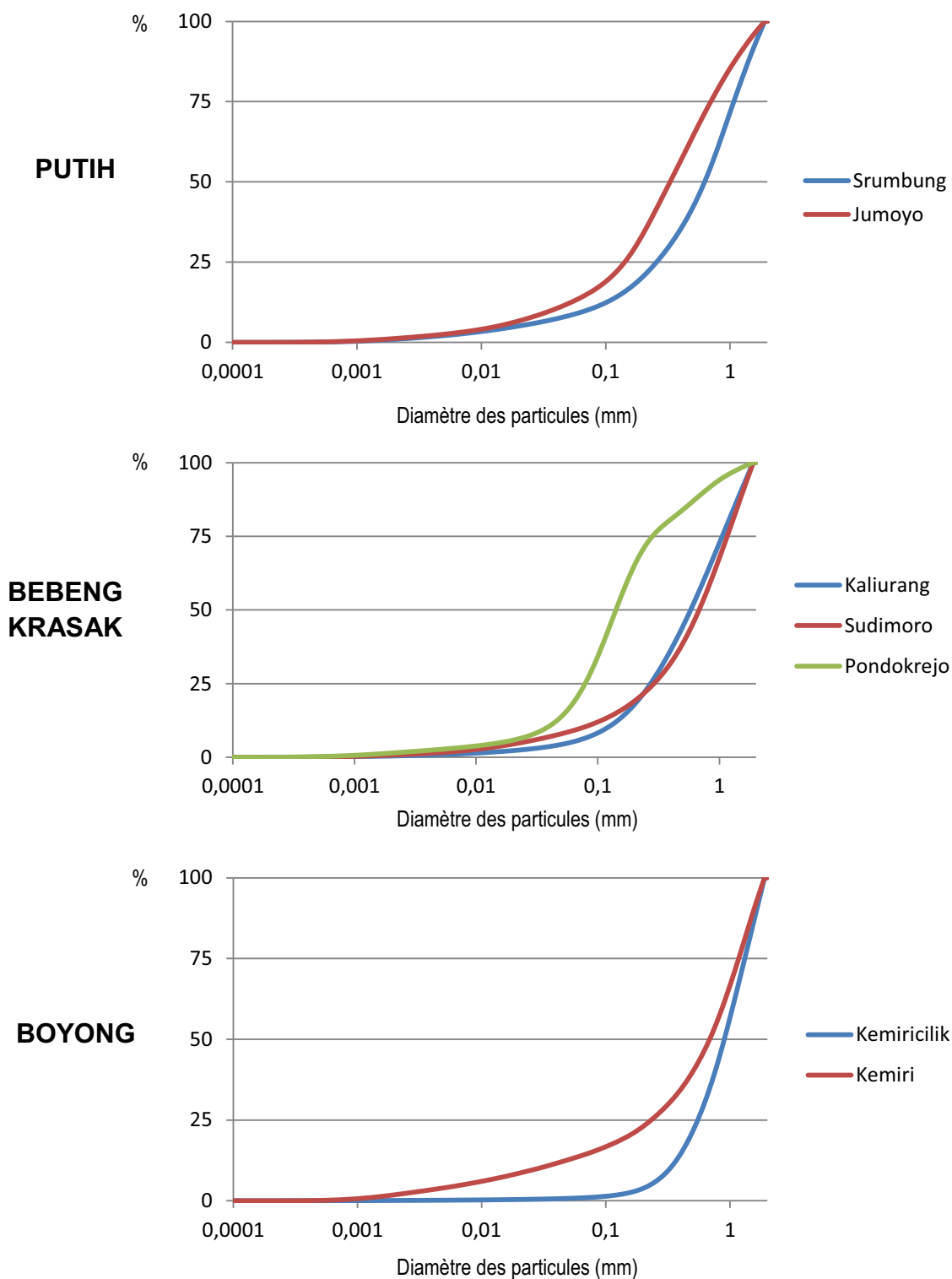
*A – Diamètres
décroissants en
mm*

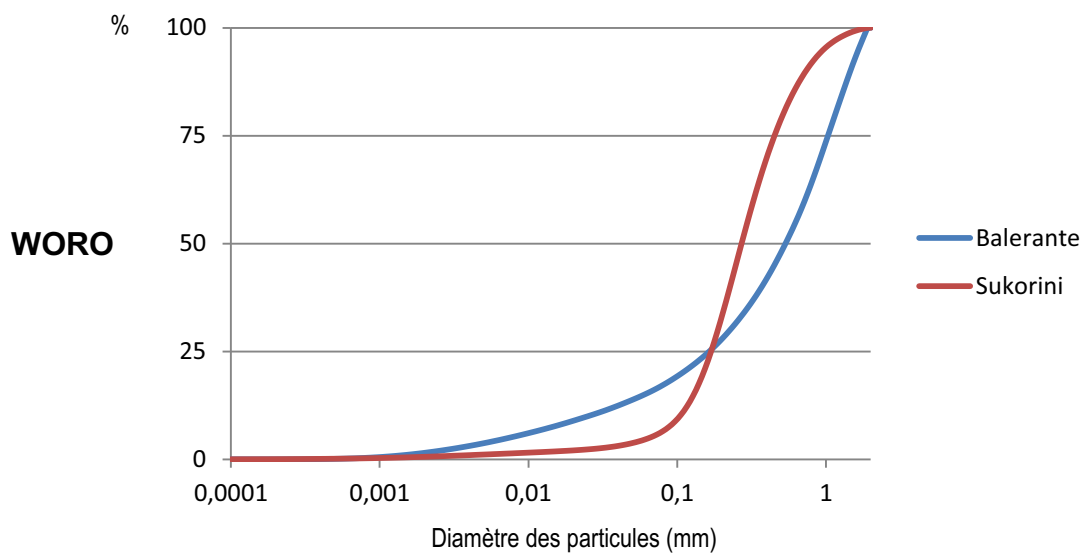
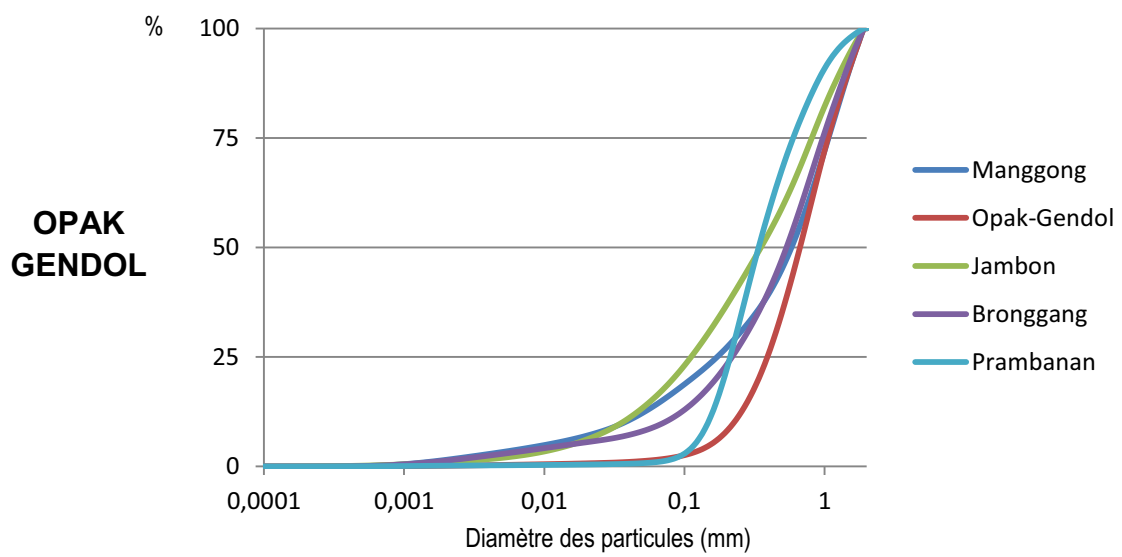
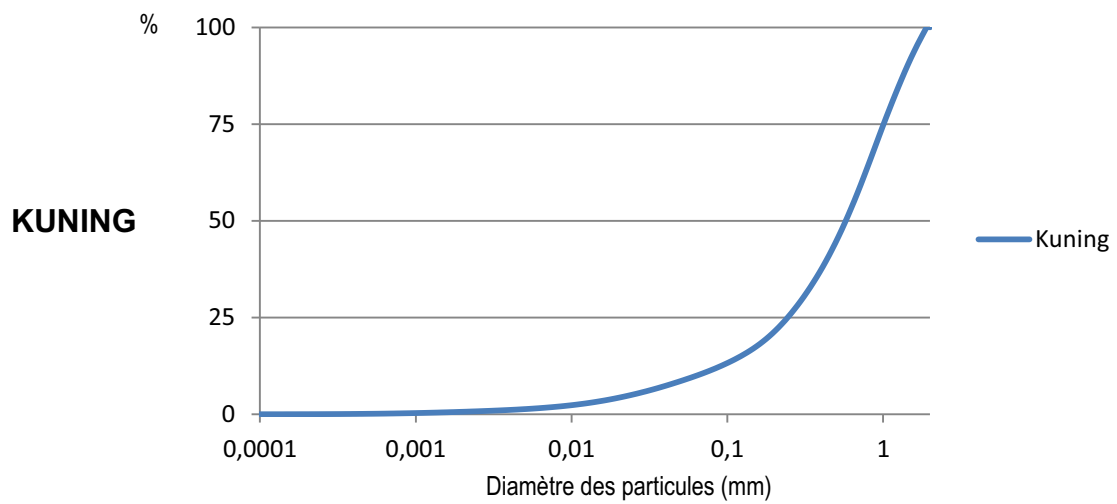
<i>n</i> Quantiles	Q1	Q5	Q10	Q16	Q25	Q50	Q75	Q84	Q90	Q95	Q99
Be-Kal	1,86284053	1,68619496	1,49607352	1,300613	1,0560997	0,58085169	0,27180507	0,18144269	0,11943732	0,05909893	0,0060009
Be-Sud	1,87080899	1,72104009	1,55731693	1,38580599	1,16171299	0,68171774	0,28966304	0,15586278	0,07420567	0,02355943	0,00278943
Bo-Kek	1,88089567	1,76899836	1,64302349	1,50444396	1,31695316	0,90150792	0,55073203	0,42275711	0,32904637	0,23012046	0,07243422
Bo-Kem	1,8700138	1,71824738	1,55725613	1,39188315	1,17732681	0,68700419	0,23242839	0,08974334	0,02851016	0,00720189	0,00128199
Ge-Br	1,85988931	1,67602438	1,48664996	1,29927875	1,0673815	0,58063567	0,17117379	0,07650662	0,03701833	0,01042363	0,0014436
Ge-Cf(2)	1,85993549	1,67492313	1,47851947	1,28298146	1,0592197	0,66772531	0,39070824	0,29491218	0,22518823	0,15359461	0,03735981
Ge-Jb(2)	1,82971169	1,55174969	1,2917509	1,05884617	0,81130967	0,35130322	0,11164445	0,06259651	0,03573814	0,01564931	0,00200751
Ge-Pl	1,84918504	1,63192036	1,41711513	1,21206289	0,97250017	0,53480965	0,21874835	0,12908632	0,07127193	0,01517349	0,00157442
Ge-Pr	1,6993619	1,23267674	0,96813411	0,78240536	0,59802865	0,3387152	0,21203443	0,17445414	0,14708259	0,11795054	0,06286749
Kr-Pk(2)	1,66296493	1,08153159	0,74432028	0,50119444	0,28249604	0,14111069	0,07869184	0,05641195	0,03798026	0,01590765	0,00138533
Ku	1,85042959	1,63818969	1,42954117	1,23604856	1,00758904	0,5752924	0,24371628	0,13434972	0,06367079	0,02423862	0,00346545
Pu-Ju	1,81070888	1,4877896	1,19889547	0,95257327	0,70103527	0,32967132	0,14214679	0,07822995	0,036912	0,01330927	0,00169341
Pu-Sr	1,86034808	1,67721975	1,48701271	1,29936898	1,07276935	0,62482094	0,25644789	0,14475752	0,07066762	0,01931784	0,00210434
Wo-Bal	1,85539213	1,65816432	1,45847563	1,26760578	1,03231541	0,53469604	0,16432235	0,06906029	0,02520506	0,00745118	0,00149085
Wo-Suk	1,49100848	0,96792829	0,7346504	0,58422898	0,45180564	0,27083236	0,16895824	0,13329158	0,10408835	0,06531762	0,00426159
Quantiles	Q1	Q5	Q10	Q16	Q25	Q50	Q75	Q84	Q90	Q95	Q99
Be-Kal	-0,8975042	-0,7537714	-0,5811811	-0,3791917	-0,078746	0,78375826	1,87935574	2,46241419	3,06567435	4,08072411	7,38060438
Be-Sud	-0,9036623	-0,7832807	-0,6390626	-0,4707253	-0,2162537	0,55275356	1,78755248	2,68165168	3,7523267	5,40755169	8,48581303
Bo-Kek	-0,9114198	-0,8229327	-0,7163531	-0,5892304	-0,397204	0,14958793	0,86057758	1,24209907	1,60363717	2,11953881	3,78718486
Bo-Kem	-0,9030489	-0,7809378	-0,6390063	-0,4770381	-0,2355149	0,5416092	2,10514178	3,47805131	5,13238016	7,11740844	9,6074033
Ge-Br	-0,8952168	-0,7450431	-0,572065	-0,377711	-0,0940759	0,7842949	2,54646629	3,70827155	4,75561625	6,58399865	9,43611545
Ge-Cf(2)	-0,8952526	-0,7440949	-0,5641532	-0,3595003	-0,0830019	0,58267338	1,35583643	1,76164267	2,1507967	2,70280051	4,74236909
Ge-Jb(2)	-0,8716163	-0,6338959	-0,3693279	-0,082493	0,30167541	1,5092113	3,16301656	3,99777395	4,80639171	5,99775757	8,96037624
Ge-Pl	-0,8868896	-0,7065707	-0,502957	-0,2774646	0,04022959	0,9029026	2,19265599	2,95359193	3,81052226	6,0423035	9,31096804
Ge-Pr	-0,7649931	-0,3017945	0,04672118	0,35401184	0,7417135	1,56185536	2,23762957	2,51908026	2,76530163	3,08374602	3,99154202
Kr-Pk(2)	-0,7337577	-0,1130758	0,42600454	0,99655767	1,82369743	2,82510083	3,66764221	4,14785536	4,71860623	5,97413584	9,49555783
Ku	-0,8878602	-0,7121024	-0,5155522	-0,3057354	-0,0109073	0,79763268	2,03672547	2,89593481	3,97322454	5,36654869	8,17274276
Pu-Ju	-0,8565546	-0,5731705	-0,2617059	0,07009803	0,51244106	1,6008997	2,81454658	3,67613509	4,75976641	6,23142474	9,20584953
Pu-Sr	-0,8955726	-0,7460717	-0,572417	-0,3778112	-0,1013399	0,67848529	1,96326242	2,78828977	3,82280697	5,69392228	8,89241327
Wo-Bal	-0,8917241	-0,729587	-0,5444613	-0,3421061	-0,0458838	0,9032091	2,60539939	3,85599989	5,3101427	7,06831585	9,38965101
Wo-Suk	-0,5762885	0,04702792	0,44487022	0,77539417	1,14622581	1,88452798	2,56526135	2,90734242	3,26411943	3,93638401	7,87439364

*B – Diamètres
décroissants en
 φ*

Annexe C.4 – Courbes granulométriques des échantillons de fraction fine (< 2 mm)

Détail des courbes granulométriques des échantillons de matrice interclastique par principaux corridors de lahars. Analyse granulométrique réalisée au Laboratoire de Géographie Physique (UMR 8595, CNRS), Meudon.





Annexes D

Les questionnaires

Annexe D.1 – Questionnaire de connaissance et perception de l'aléa lahar (décembre 2010)

D.1.1 – Tableau des résultats du questionnaire

Questionnaire adressé à 630 personnes du 9 au 14 décembre 2010, 625 questionnaires menés jusqu'au bout. Valeurs du tableau en pourcentages.

N°	RIVIERES	SENOWO		PABELAN	BLONGKENG			PUTIH	BEBENG			BOYONG		KUNING	GENDOL		WORD	
	SITES	Mangunsuko	Sumber	Gondowangi-Pabelan	Gulon	Gunungpring	Bringin	Jumoyo	Kemiren	Sudimoro	Kamongan	Purwobinangun	Candibinangun-Danaharjo	Hargobinangun	Kepuharjo	Argomulyo	Talun-Kendalsari	Bawukan
1	Sexe																	
	1: Homme	53,3	80,0	74,3	70,0	46,7	35,0	76,0	36,0	60,0	56,0	40,0	32,0	58,8	62,7	38,5	67,5	100,0
	2: Femme	46,7	20,0	25,7	30,0	53,3	65,0	24,0	64,0	40,0	44,0	60,0	68,0	41,2	37,3	61,5	32,5	0,0
2	Âge																	
	1: ≤ 20 ans (enfants et adolescents)	13,3	0,0	11,4	0,0	0,0	0,0	12,0	14,0	13,3	4,0	3,1	8,0	10,0	3,0	15,4	0,0	0,0
	2: 21-35 ans (jeunes adultes)	60,0	40,0	40,0	60,0	60,0	45,0	44,0	32,0	28,9	28,0	49,2	28,0	30,0	38,8	30,8	42,5	40,0
	3: 36-65 ans (adultes)	26,7	53,3	48,6	40,0	40,0	55,0	44,0	52,0	55,6	64,0	47,7	52,0	56,2	52,2	53,8	55,0	60,0
	4: > 65 ans	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,2	4,0	0,0	12,0	3,8	1,5	0,0	2,5	0,0
2bis	Âge moyen par site	32,4	44,3	37,5	37,5	36,2	35,5	33,7	36,6	37,2	39,8	36,8	43,5	39,3	38,8	34,8	38,5	35,4
3	Craignez-vous les lahars?																	
	1: Non	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	20,0	60,0	69,2	32,0	61,2	32,8	0,0	47,5	100,0
	2: Un peu	0,0	0,0	71,4	55,0	46,7	15,0	0,0	14,0	15,6	28,0	18,5	4,0	5,0	29,9	0,0	46,3	0,0
	3: Oui	16,7	20,0	28,6	45,0	46,7	85,0	64,0	68,0	64,4	12,0	12,3	64,0	33,8	37,3	69,2	6,3	0,0
	4: Oui, beaucoup	83,3	80,0	0,0	0,0	6,7	0,0	36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,8	0,0	0,0
4	Un lahar désigne:																	
	1: de l'eau boueuse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2: de l'eau boueuse transportant du sable	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	60,0	0,0
	3: de l'eau boueuse transportant du sable, des blocs	70,0	0,0	37,1	75,0	33,3	50,0	0,0	76,0	55,6	72,0	46,2	20,0	0,0	7,5	15,4	2,5	0,0
	4: de l'eau boueuse transportant du sable et des blocs et des débris végétaux	30,0	100,0	62,9	25,0	66,7	0,0	100,0	12,0	44,4	28,0	53,8	80,0	100,0	92,5	84,6	37,5	100,0

5	La vitesse d'un lahar est d'environ:																
	1: 5-25 km/h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2: 25-45 km/h	0,0	0,0	17,1	10,0	13,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3: 45-65 km/h	0,0	0,0	80,0	40,0	40,0	35,0	0,0	2,0	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7,7	8,8
	4: 65-85 km/h	100,0	100,0	2,9	50,0	46,7	65,0	100,0	98,0	94,1	100,0	100,0	100,0	100,0	92,5	76,9	94,3
6	Un lahar suit toujours le tracé d'une rivière																
	1: Oui	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	80,0	100,0	90,0	100,0	44,0	100,0	100,0	100,0	100,0	69,2	100,0
	2: Non	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	10,0	0,0	56,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,8	0,0
7	Un lahar peut déborder sur les berges																
	1: Oui	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	90,0	68,9	28,0	96,9	44,0	55,0	100,0	100,0	100,0
	2: Non	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	31,1	72,0	0,0	56,0	45,0	0,0	0,0	0,0
	3: Ne sait pas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	Un lahar peut détruire des maisons																
	1: Oui	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	76,0	55,6	16,0	61,5	0,0	37,5	100,0	100,0	100,0
	2: Non	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24,0	44,4	84,0	1,5	92,0	62,5	0,0	0,0	0,0
	3: Ne sait pas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,9	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	Un lahar peut emporter des ponts																
	1: Oui	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	70,0	55,6	28,0	93,8	8,0	37,5	100,0	100,0	100,0
	2: Non	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	44,4	72,0	0,0	92,0	62,5	0,0	0,0	0,0
	3: Ne sait pas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	Un lahar peut endommager une route																
	1: Oui	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	70,0	55,6	12,0	56,9	0,0	37,5	100,0	100,0	100,0
	2: Non	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	44,4	88,0	9,2	92,0	62,5	0,0	0,0	0,0
	3: Ne sait pas		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,8	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	Avez-vous déjà extrait du sable dans les dépôts de lahars?																
	1: Oui	46,7	93,3	82,9	70,0	33,3	40,0	56,0	34,0	57,8	0,0	46,2	8,0	47,5	100,0	61,5	65,0
	2: Non	53,3	6,7	17,1	30,0	66,7	60,0	44,0	66,0	42,2	100,0	53,8	92,0	52,5	0,0	38,5	35,0

D.1.2 – Tableaux de contingence et tests du khi² du questionnaire D.1

Test du khi² entre le genre des répondants et la question 3 « craignez-vous les lahars ? » :

	Hommes	Femmes	TOTAL
Non	228	123	351
Oui	129	145	274
TOTAL	357	268	625

NB – Les effectifs ont été regroupés en classes afin que les effectifs théoriques soient systématiquement > 5 pour assurer la validité

Test d'indépendance entre les lignes et les colonnes (avec correction de continuité de Yates pour tous les tests)

Khi ² (Valeur observée)	19,355
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre le genre des répondants et la question 4 (capacité à donner une réponse exacte à la question « un lahar désigne... ») :

	Hommes	Femmes	TOTAL
Bonne réponse	122	122	244
Mauvaise réponse	235	146	381
TOTAL	357	268	625

Khi ² (Valeur observée)	7,814
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,005
alpha	0,05

Test du khi² entre le genre des répondants et la question 8 « un lahar peut détruire des maisons » :

	Hommes	Femmes	TOTAL
Oui	292	180	472
Non/ignore	65	88	153
TOTAL	357	268	

Khi ² (Valeur observée)	16,937
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre l'âge des répondants ($n = 622$, 3 personnes n'ont pas donné leur âge) et la question 3 « craignez-vous les lahars ? » :

	< 35 a	> 35 ans	TOTAL
Non	160	191	351
Oui	129	142	271
TOTAL	289	333	622

Khi ² (Valeur observée)	0,176
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,675
alpha	0,05

Test du khi² entre l'âge des répondants ($n = 622$) et la question 4 (capacité à donner une réponse exacte à la question « un lahar désigne... ») :

	< 35 a	>35 a	TOTAL
Bonne réponse	110	134	244
Mauvaise réponse	179	199	378
TOTAL	289	333	622

Khi ² (Valeur observée)	0,223
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,637
alpha	0,05

Test du khi² entre le genre des répondants ($n = 622$) et la question 8 « un lahar peut détruire des maisons » :

	< 35 a	>35 a	TOTAL
Oui	220	249	469
Non/ignore	69	84	153
TOTAL	289	333	622

Khi ² (Valeur observée)	0,088
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,767
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 11 (« avez-vous déjà creusé du sable dans les dépôts de lahars ? ») et la question 3 « craignez-vous les lahars ? » :

	Mineur	Non mineur	TOTAL
Non	206	145	351
Oui	146	128	274
TOTAL	352	273	625

Khi ² (Valeur observée)	1,614
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,204
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 11 (« avez-vous déjà creusé du sable dans les dépôts de lahars ? ») et la question 4 (capacité à donner une réponse exacte à la question « un lahar désigne... ») :

	Mineur	Non mineur	TOTAL
Bonne réponse	252	129	381
Mauvaise réponse	100	144	244
TOTAL	352	273	625

Khi ² (Valeur observée)	37,253
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 11 (« avez-vous déjà creusé du sable dans les dépôts de lahars ? ») et la question 8 « un lahar peut détruire des maisons » :

	Mineur	Non mineur	TOTAL
Oui	320	152	472
Non/ignore	32	121	153
TOTAL	352	273	625

Khi ² (Valeur observée)	101,335
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Annexe D.2 – Questionnaire préliminaire sur l’activité d’extraction (août 2009)

Questionnaire adressé à 95 personnes le 19 août 2009. Valeurs du tableau en pourcentages.

Questions	Réponses (%)
Genre	
Homme	87
Femme	13
Âge	
< 18 ans	3
19-30 ans	16
31-50 ans	68
> 51 ans	13
Travaillez-vous en...	
Equipe	99
Seul	1
Votre équipe est-elle:	
A composition fixe	98
Variable	2
Travaillez-vous en tant que...	
Salarié d'une entreprise	17
Travailleur indépendant	83
Où habitez-vous ?	
Sleman	88
Yogyakarta	7
Klaten	5
Magelang	0
Hors Merapi	0
Comment venez-vous travailler ?	
Camion	32
Moto	32
A pied	36
Combien de temps par jour travaillez-vous ici?	
< de 6h	13
De 6h à 10h	13
> de 10h	74
Combien de jours par semaine travaillez-vous ici?	
< de 6 jours	13
6 jours	6
Tous les jours	81
Combien gagnez-vous par jour?	
< 15000 Rp	0
15000 à 30000 Rp	39
30000 à 60000 Rp	51
> 60000 Rp	10

Annexe D.3 – Questionnaire sur l'activité d'extraction après l'éruption de 2010 (juin 2011)

D.3.1 – Tableau des résultats du questionnaire

Questionnaire adressé à 733 personnes du 21 au 29 juin 2011 (exceptés les 24 et 26 juin). Valeurs du tableau en pourcentages.

N°	VALLEES	PUTIH		BEBENG		KRASAK	BOYONG		KUNING		GENDOL				WORO	
	SITES QUESTIONS	SRUMBUNG	JUMOYO	KALIURANG	SUDIMORO	PONDOKREJO	KEMIRICILIK	KEMIRI	DAM KUNING	CANGKRINGAN	BRONGGANG	PLUMBON	JAMBON	OPAK- GENDOL	BALERANTE	SUKORINI
1	Sexe															
	1: Homme	66%	95	100	89	91	97	89	100	100	96	99	90	100	92	100
	2: Femme	34%	5	0	11	9	3	11	0	0	4	1	10	0	8	0
2	Âge															
	1: < 18 ans	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	0
	2: 18 - 30 ans	0%	30	7,5	16	40	5	8	10	16	17	25	8	5,0	19	27
	3: 30 - 50 ans	36%	58	85,0	84	55	71	82	76	84	74	65	83	72,5	80	62
	4: > 50 ans	64%	12	7,5	0	6	24	11	14	0	9	10	8	22,5	1	12
	0: <14 ou > 70 ans	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2bis	Âge moyen par site															
3	Statut															
	1: Célibataire sans enfants	0%	22	3	17	17	3	5	7	16	13	17	6	2,5	17	12
	2: Chef de famille	100%	78	97	83	83	97	95	93	84	87	83	94	97,5	83	88
	3: Autre	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Lieu de résidence															

	1: Yogyakarta	0%	0	0	10	0	18	0	7	8	6	12	13	3,0	0	4
	2: Sleman	0%	15	0	3	66	79	92	90	64	77	53	51	64,0	0	19
	3: Boyolali	0%	0	0	0	0	0	0	0	8	1	7	2	3,0	5	4
	4: Magelang	98%	85	78	74	19	0	0	0	0	0	0	2	0,0	3	0
	5: Klaten	0%	0	0	0	0	0	3	0	12	9	6	15	10,0	75	57
	o: Autre (préciser)	2%	0	22	13	15	3	5	3	8	7	22	17	20,0	17	16
	Semarang	2%		19	6	1,5				4		6	2		4	
	Pati			3	3								4			
	Demak				1	4					3	1			3	
	Kudus				3	4				4	1	4	2	12,5	5	
	Jepara					4					1		2	2,5		
	Kulon Progo					1,5										
	Pacitan											1				4
	Solo											6		2,5	4	4
	Sragen											1				
	Bantul												6			4
	Wonogiri										1	3		2,5	1	
	Wonosari						3	5	3							4
5	Niveau d'étude															
	1: Primaire	45%	10	14	7	13	13	24	3	4	16	8	17	17,5	5	15
	2: Secondaire	55%	90	86	93	75	87	76	97	96	81	92	83	80,0	95	85
	3: Supérieur	0%	0	0	0	11	0	0	0	0	3	0	0	2,5	0	0
6	o: Autre (préciser)	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0
	Gains par jour															
	1: < 15 000 Rp	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0
	2: 15 000 à 60 000 Rp	61%	53	49	54	15	63	34	28	60	27	51	65	60,0	56	46
	3: 60 000 à 100	34%	47	29	0	49	37	45	52	0	66	36	25	20,0	0	35

	ooo Rp 4: > 100 000 Rp	5%	0	22	46	36	0	21	21	40	7	13	10	20,0	44	19
7	Méthode de travail sur le site 1: Equipe permanente 2: Pas d'équipe permanente 3: Travaille seul 4: Cela dépend	25%	7	46	13	74	13	61	59	4	46	68	69	75,0	25	65
		27%	28	20	87	2	82	13	24	96	36	32	4	0,0	75	19
		48%	47	34	0	25	0	26	17	0	19	0	25	22,5	0	12
		0%	18	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	2,5	0	4
8	Rôle 1: Chauffeur 2: Creuseur 3: Cela dépend	20%	17	49	46	23	29	32	31	40	29	49	44	40,0	44	38
		80%	83	51	54	72	71	68	69	60	71	51	56	60,0	56	62
		0%	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0
9	Fréquence de changement de site d'extraction 1: Jamais 2: Parfois 3: Souvent	80%	60	69	100	60	68	76	83	72	73	53	67	67,5	97	54
		14%	40	31	0	8	32	21	14	28	26	44	25	30,0	3	38
		6%	0	0	0	32	0	3	3	0	1	3	8	2,5	0	8
10	Travail dans les sites d'extraction depuis... 1: L'éruption de 2010 2: 5 à 10 ans 3: > 10 ans	95%	65	23	34	60	55	84	90	92	76	64	46	75,0	41	58
		5%	33	65	66	29	45	16	10	8	10	30	48	17,5	59	42
		0%	3	12	0	11	0	0	0	0	14	6	6	7,5	0	0
11	Travail exclusivement dans les sites															

	d'extraction															
	1: Oui	75%	53	8	33	25	26	34	17	64	51	79	27	35,0	40	8
	2: Non	25%	47	92	67	75	74	66	83	36	49	21	73	65,0	60	92
12a	Si oui, quel était le précédent travail ?															
	1: Agriculteur	82%	43	40	48	0	20	54	40	88	42	40	77	86,0	40	0
	2: Autre (préciser)	0%	52	0	13	15	70	0	40	12	33	47	23	7,0	17	100
	Chasseur		38		9	15	50		20	13	17	39	8		17	50
	Chauffeur		4								3					50
	Eleveur		10				10				7	7	8	7,0		
	Marchand						10		20							
	Maçon										3					
	Privé															
	Tenancier de warung												8			
	NC				4						3					
	0: Sans emploi	18%	5	60	39	85	10	46	20	0	25	12		7,0	43	0
12b	Si non, possède un travail en plus															
	1: Oui (lequel)	36%	53	55	79	90	100	64	67	89	85	60	51	81	64	79
	Agriculteur	18%	26	30	77	42	29	28	33	78	32		29	62	60	29
	Eleveur	9%	16	25	2	5	61	32	29		35	60	20	15		17
	Marchand	9%				0	3	4	4							
	Chasseur		11			15	7			11	9				4	
	Chauffeur					28					3					33
	Maçon										6					
	Fonctionnaire													4		
	Tenancier de												2			

	warung														
	2: Non	0%	47	45	21	10	0		11	15	40	49	19	36	21
	N.C.	61%	0	0	0	0	0	36	33	0	0	0	0	0	0
13	Lequel de ces aléas est le plus fréquent dans le lieu d'extraction?														
	1: PDC	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2: Lahar	100%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	3: Eboulements	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0: Coulée de lave	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Les lahars peuvent transporter des blocs de grande dimensions et des débris														
	1: Vrai	100%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	2: Faux	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Un lahar est à craindre s'il pleut au sommet du Merapi, mais pas forcément s'il pleut dans la vallée														
	1: Vrai	100%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	2: Faux	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	Des lahars peuvent survenir après chaque éruption						0								

	1: Vrai 2: Faux	100% 0%	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0
17	Creuser trop près des versants peut provoquer des éboulements 1: Vrai 2: Faux	100% 0%	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0	100 0
18	Existe-t-il sur ce site quelqu'un équipé d'un HT chargé de prévenir les travailleurs en cas de danger? 1: Oui 2: Non	95% 5%	100 0	8 92	100 0	77 23	100 0	100 0	100 0	0 100	100 0	100 0	0 100	100 0	0 100
19	Continuez-vous à creuser même s'il pleut au sommet du Merapi ? 1. Oui 2. Non	39% 61%	0 100	0 100	0 100	72 28	0 100	58 42	24 76	80 20	23 77	0 100	0 100	100 0	0 100
20	Avez-vous déjà assisté à un lahar? 1: Oui 2: Non	98% 2%	100 0	77 23	87 13	100 0	87 13	95 5	97 3	96 4	97 3	81 19	83 17	97,5 2,5	92 8
21	L'accès au site d'extraction est...											0			

	1: Gratuit 2: Payant	80% 20%	78 22	51 49	49 51	64 36	63 37	87 13	79 21	64 36	71 29	49 51	56 44	60,0 40,0	56 44	65 35
22	Est-il obligatoire d'obtenir un permis officiel pour travailler ici ? 1: Oui 2: Non	 5% 95%	 22 78	 0 100	 4 96	 13 87	 8 92	 0 100	 14 86	 0 100	 46 54	 100 0	 2 98	 0,0 100,0	 96 4	 0 100
23	Possédez-vous ce permis? 1: Oui 2: Non	 0% 100%	 5 95	 0 100	 0 100	 0 100	 0 100	 0 100	 7 93	 0 100	 37 63	 10 90	 2 98	 0,0 100,0	 0 100	 0 100
24	Avez-vous déjà entamé des démarches administratives pour demander ce permis ? 1: Oui 2: Non	 0% 100%	 0 100	 0 100	 0 100	 8 92	 0 100	 0 100	 7 93	 0 100	 31 69	 0 100	 2 98	 0,0 100,0	 0 100	 0 100
25	Vous êtes encadré par: 1: ONG 2: Une équipe de travail informelle 3: Une entreprise 4: Autre 0: Indépendant	 0% 18% 2% 0% 80%	 58 10 10 22 0	 0 54 17 0 29	 0 100 0 0 0	 0 23 0 0 77	 0 5 24 0 71	 0 39 8 0 53	 0 41 21 0 38	 0 100 0 0 0	 0 16 26 11 47	 0 7 49 0 44	 0 60 21 0 19	 0,0 62,5 17,5 0,0 20,0	 0 100 0 0 0	 0 23 8 0 69

26	Combien de temps par jour passez-vous sur ce site?															
	1: Moins de 6 h	25%	7	17	19	0	3	18	31	28	4	10	42	17,5	21	0
	2: Entre 6 et 10 h	61%	50	49	67	40	82	69	59	64	67	76	46	60,0	65	62
	3: Plus de 10h	0%	5	22	14	30	0	5	0	8	4	4	10	15,0	13	27
	o: Cela dépend	14%	38	12	0	30	16	8	10	0	25	10	2	7,5	1	12
27	Combien de jours par semaine travaillez-vous ici ?															
	1: Moins de 3 jours	11%	0	0	11	0	0	13	3	8	4	3	2	10,0	8	0
	2: Entre 3 et 5 jours	30%	40	25	53	30	37	35	24	36	21	42	19	15,0	43	31
	3: Entre 5 et 6 jours	27%	28	15	36	11	37	29	45	56	33	43	44	22,5	36	4
	4: Tous les jours	30%	22	0	0	2	10	5	28	0	17	1	4	10,0	1	12
	o: Cela dépend	2%	10	60	0	57	16	18	0	0	25	11	31	42,5	12	54
28	A cause de votre travail, avez déjà éprouvé...															
	1: des douleurs musculaires chroniques?	70%	7	2	23	94	8	92	48	24	45	28	40	42,5	32	81
	2: des problèmes respiratoires chroniques?	5%	0	0	4	4	0	3	14	4	27	7	0	7,5	7	0
	3: des problèmes ou douleurs oculaires?	2%	0	0	0	0	0	0	7	0	4	0	0	0	1	0
	o: n'a éprouvé aucun de ces symptômes	23%	93	98	73	2	92	5	31	72	24	65	60	50,0	60	19

29	Avez-vous l'habitude de consulter un médecin depuis que vous travaillez ici?															
	1: Oui	2%	0	0	6	0	0	0	0	12	3	7	0	0	5	0
	2: Non	98%	100	100	94	100	100	100	100	76	97	93	100	100	94	100
	NC	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	1	0
30a	Savez-vous où est vendu le chargement de sable/blocs ?															
	1: Oui	93%	100	100	99	100	97	95	97	100	94	85	96	100	89	100
	2: Non	7%	0	0	1	0	3	5	3	0	6	15	4	0	11	0
30b	Si oui, veuillez préciser où.															
	1: DIY	0%	22	2	19	12	94	86	100	20	47	21	21,7	7,5	1	27
	2: Magelang	24%	38	58	49	40	0	0	0	4	8	0	4,3	0,0	0	0
	3: Klaten	0%	0	0	0	0	3	8	0	40	15	21	34,8	35,0	24	38
	4: Solo	2%	0	8	0	0	0	6	0	20	20	21	19,6	15,0	40	27
	5: Semarang	63%	25	29	22	23	3	0	0	4	2	11	8,7	17,5	15	4
	6: Boyolali	0%	0	0	0	0	0	0	0	8	0	5	2,2	0,0	9	0
	o: Autre (précisez)	10%	15	3	10	25	0	0	0	4	9	20	8,7	25,0	10	4
	Demak	7,50%	5		3	6					3	1,6		2,5	3	
	Kudus	2,50%			4	7,5				4	2	7,0	4,3	7,5	6	
	Purworejo					1,5										
	Jepara					6					2		2,2	7,5		
	Kulon Progo					4										
	Kendal		10													
	Wonogiri										2	5,0		7,5	1	

	Karanganyar Sragen Pacitan Pati			3	3						1,6 1,6 1,6 1,6	2,2		4		
31	Savez-vous quel usage sera fait du chargement de sable/bocs ?															
	1: Oui	86%	100	22	100	85	100	68	100	88	64	85	44	55	91	77
	2: Non	14%	0	78	0	15	0	32	0	0	36	15	56	45	9	23
	NC	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
32a	Conservez- vous du sable chez vous?															
	1: Oui	2%	0	0	0	23	0	5	0	4	10	28	15	15	0	15
	2: Non	98%	100	100	100	77	100	95	100	96	90	72	85	85	100	85
32b	Si oui, pour quel usage?															
	1: Utilisation personnelle	100%	0	0	0	25	0	50	0	0	57	100	100	67	0	0
	2: Vente au détail	0%	0	0	0	42	0	50	0	100	43	0	0	33	0	100
	NC	0%	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

D.3.2 – Tableaux de contingence et tests du khi² du questionnaire D.3

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et le genre des répondants (question 1) :

	Homme	Femme	TOTAL
Prise de risque	175	9	184
Attitude prudente	508	41	549
TOTAL	683	50	733

Khi ² (Valeur observée)	1,440
Khi ² (Valeur critique)	9,488
DDL	4
p-value	0,837
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et l'âge des répondants (question 2) :

	18-30 ans	31-50 ans	> 50 ans	TOTAL
Prise de risque	32	130	22	184
Attitude prudente	86	397	66	549
TOTAL	118	527	88	733

Khi ² (Valeur observée)	0,309
Khi ² (Valeur critique)	5,991
DDL	2
p-value	0,857
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et la provenance des répondants (question 4) :

	Merapi	Hors Merapi	TOTAL
Attitude à risque	160	24	184
Attitude prudente	480	69	549
TOTAL	640	93	733

Khi ² (Valeur observée)	0,002
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,968
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et le salaire quotidien des répondants (question 6) :

	Salaire moyen	Salaire élevé	Salaire très élevé	TOTAL
Attitude à risque	74	64	46	184
Attitude prudente	277	162	110	549
TOTAL	351	226	156	733

Khi ² (Valeur observée)	5,855
Khi ² (Valeur critique)	5,991
DDL	2
p-value	0,054
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et l'organisation du travail (question 7) :

	Equipe permanente	Pas d'équipe permanente	Travaille seul	TOTAL
Prise de risque	116	30	38	184
Attitude prudente	203	257	89	549
TOTAL	319	287	127	733

Khi ² (Valeur observée)	55,845
Khi ² (Valeur critique)	5,991
DDL	2
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et la fréquence de changement de site (question 9) :

	Fidèle à un site	Change parfois	Change souvent	TOTAL
Prise de risque	117	45	22	184
Attitude prudente	421	118	10	549
TOTAL	538	163	32	733

Khi ² (Valeur observée)	36,191
Khi ² (Valeur critique)	5,991
DDL	2
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et l'expérience des répondants dans les sites d'extraction (question 10) :

	Creuseur depuis 2010	Creuseur avant 2010	TOTAL
Attitude à risque	133	51	184
Attitude prudente	305	244	549
TOTAL	438	295	733

Khi ² (Valeur observée)	15,346
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et la situation professionnelle des répondants (question 11, double activité ou non) :

	Uniquement mineur	Double activité	TOTAL
Prise de risque	64	120	184
Attitude prudente	227	322	549
TOTAL	291	442	733

Khi ² (Valeur observée)	2,215
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,137
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et la connaissance du système de surveillance du site d'enquête (question 18) :

	Pense que le site est surveillé	Pense que le site n'est pas surveillé	TOTAL
Prise de risque	89	95	184
Attitude prudente	431	118	549
TOTAL	520	213	733

Khi ² (Valeur observée)	59,263
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et l'expérience de l'aléa (question 20) :

	A déjà vu un lahar	N'a jamais assisté à un lahar	TOTAL
Prise de risque	180	4	184
Attitude prudente	488	61	549
TOTAL	668	65	733

Khi ² (Valeur observée)	12,537
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,000
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et la gratuité des sites (question 21) :

	Accès gratuit au site	Accès payant	TOTAL
Prise de risque	123	61	184
Attitude prudente	335	214	549
TOTAL	458	275	733

Khi ² (Valeur observée)	1,756
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,185
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et l'encadrement des travailleurs (question 25) :

	Encadrement	Pas d'encadrement régulier	TOTAL
Risque	94	90	184
Prudent	194	355	549
TOTAL	288	445	733

Khi ² (Valeur observée)	13,679
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,000
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et le rythme de travail quotidien (question 26) :

	Irrégulier ou < 6h / jour	> 6h / jour	TOTAL
Risque	50	134	184
Prudent	154	395	549
TOTAL	194	529	733

Khi ² (Valeur observée)	0,018
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,893
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? ») et le rythme de travail hebdomadaire des répondants (question 27) :

	Pas de rythme fixe	Moins de 3 jours	3 à 4 jours	5 à 6 jours	Tous les jours	TOTAL
Prise de risque	67	10	43	43	21	184
Attitude prudente	100	28	197	185	39	549
TOTAL	167	38	240	228	60	733

Khi ² (Valeur observée)	34,505
Khi ² (Valeur critique)	9,488
DDL	4
p-value	< 0,0001
alpha	0,05

Test du khi² entre la question 19 (« Continuez-vous à creuser s'il pleut au sommet du Merapi ? » avec $n = 720$) et le lieu de vente du matériel extrait (question 30b) :

	Merapi	Hors Merapi	TOTAL
Prise de risque	114	68	182
Attitude prudente	310	208	518
TOTAL	444	276	720

Khi ² (Valeur observée)	0,330
Khi ² (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value	0,565
alpha	0,05

Annexe D.4 – Exemple d'un document de travail pour les enquêteurs du questionnaire D.3

Première page du questionnaire traduit en indonésien. Chaque colonne correspond à un répondant ; l'enquêteur remplit les cases avec le numéro de la réponse choisie par le répondant.

Université Paris 1 - UGM
UMR 8591 LGP - CNRS

QUESTIONNAIRE PENAMBANGAN PASIR MERAPI 2011

MIA VITA
2008-2012

Tanggal	
NAMA PEWAWANCARA	
SITE N°	



TEMA	No	PERTANYAAN	Responden n°...	Responden n°...	Responden n°...	Responden n°...	Responden n°...
A Data Diri Responden	1	Jenis Kelamin 1: Laki-laki 2: Perempuan					
	2	Umur 1: < 18 tahun 2: 18 - 30 tahun 3: 30 - 50 4: > 50 0: <14 atau > 70 tahun	Klasifikasi Umur				
	3	Status Pernikahan 1: Lajang 2: Tanggungan keluarga 3: Lain-lain					
	4	Tempat Tinggal 1: Yogyakarta 2: Sleman 3: Boyolali 4: Magelang 0: Kota Lain					
B Aspek Sosial Ekonomi	5	Jenjang pendidikan 1: SD 2: SMP atau SMA 3: Universitas 0: Lain-lain					
	6	Pendapatan per hari 1: < 15 000 Rp 2: 15 000 a 60 000 Rp 3: 60 000 a 100 000 Rp 4: > 100 000 Rp					
	7	Cara pekerjaan 1: Mempunyai tim tetap 2: Sering ganti tim 3: Bekerja sendiri 4: Fleksibel					
	8	Bekerja sebagai... 1: Sopir 2: Penambang 3: Fleksibel					
	9	Frekuensi perubahan lokasi penambangan 1: Tidak pernah 2: Kadang-kadang 3: Sering					
	10	Penambang sejak... 1: Erupsi tahun 2010 2: 5-10 tahun 3: > 10 tahun					
	11	Telah berpindah pekerjaan menjadi penambang 1: Iya 2: Tidak					
	12a	Jika iya: apakah pekerjaan anda dahulu? 1: Petani 2: Lain-lain (sebutkan) 0: Pengangguran					
	12b	Jika tidak: apakah anda mempunyai pekerjaan tetap/sampingan lainnya? (sebutkan) 1: Iya 2: Tidak	Klasifikasi Pekerjaan				

Annexes E

Les sites d'extraction du Merapi

Annexe E.1 – Exemples de tableaux de comptage de camions

E.1.1 – Site majeur : Jambu-Kaliadem (Gendol), jeudi 24/06/2010

Nombre total de camions entrant : 1070 ; nombre total de camions sortant : 1022.

Marge d'erreur : ± 50 compte tenu des camions éventuellement déjà sur le site avant 7h.

Heure		Nombre de camions				TOTAUX PAR TRANCHE HORAIRE
		Kepuharjo (versant ouest)		Glagaharjo (versant est)		
		Entrées	Sorties	Entrées	Sorties	
7h	07h-07h15	6	0	6	0	12
	07h15-07h30	12	0	14	2	28
	07h30-07h45	12	4	22	2	40
	07h45-08h	2	4	12	10	28
	TOTAL	32	8	54	14	108
8h	08h-08h15	6	6	2	4	18
	08h15-08h30	6	10	12	14	42
	08h30-08h45	8	14	24	8	54
	08h45-09h	12	8	2	20	42
	TOTAL	32	38	40	46	156
9h	09h-09h15	6	18	6	10	40
	09h15-09h30	14	8	10	18	50
	09h30-09h45	8	14	22	20	64
	09h45-10h	32	8	26	34	100
	TOTAL	60	48	64	82	254
10h	10h-10h15	16	16	8	38	78
	10h15-10h30	22	14	36	16	88
	10h30-10h45	28	6	22	14	70
	10h45-11h	18	4	6	14	42
	TOTAL	84	40	72	82	278
11h	11h-11h15	32	8	18	2	60
	11h15-11h30	26	10	26	16	78
	11h30-11h45	48	4	34	16	102
	11h45-12h	24	14	42	10	90
	TOTAL	130	36	120	44	330
12h	12h-12h15	28	36	40	30	134
	12h15-12h30	42	16	28	24	110
	12h30-12h45	44	24	26	4	98
	12h45-13h00	34	14	18	10	76
	TOTAL	148	90	112	68	418
13h	13h-13h15	2	4	16	14	36
	13h15-13h30	4	12	4	6	26
	13h30-13h45	12	38	12	16	78
	13h45-14h	0	8	2	14	24
	TOTAL	18	62	34	50	164
14h	14h-14h15	8	20	10	4	42
	14h15-14h30	8	16	2	16	42
	14h30-14h45	2	22	8	10	42
	14h45-15h	0	28	2	16	46
	TOTAL	18	86	22	46	172
15h	15h-15h15	0	10	6	4	20
	15h15-15h30	4	20	0	10	34
	15h30-15h45	6	10	0	6	22
	15h45-16h	2	14	2	2	20
	TOTAL	12	54	8	22	96

16h	16h-16h15	4	20	0	16	40
	16h15-16h30	4	10	0	18	32
	16h30-16h45	2	0	0	14	16
	16h45-17h	0	16	0	12	28
	TOTAL	10	46	0	60	116
17H	17h-17h15	0	0	0	0	0
	17h15-17h30	0	2	0	0	1
	17h30-17h45	0	0	0	0	0
	17h45-18h	0	2	0	0	1
	TOTAL	0	0	0	0	2
TOTAL 24/06/2010		544	508	526	514	

E.1.2 – Site mineur : Turgo (Boyong), mardi 15/06/2010

Nombre total de camions entrant : 12 ; nombre total de camions sortant : 12.

Heure		Nombre de camions		TOTAUX PAR TRANCHE HORAIRE
		Turgo		
		Entrées	Sorties	
7h	07h-07h15	0	0	0
	07h15-07h30	0	0	0
	07h30-07h45	0	0	0
	07h45-08h	0	0	0
	TOTAL	0	0	0
8h	08h-08h15	0	0	0
	08h15-08h30	2	0	2
	08h30-08h45	0	0	0
	08h45-09h	0	0	0
	TOTAL	2	0	2
9h	09h-09h15	0	0	0
	09h15-09h30	0	0	0
	09h30-09h45	0	0	0
	09h45-10h	0	0	0
	TOTAL	0	0	0
10h	10h-10h15	0	0	0
	10h15-10h30	0	1	1
	10h30-10h45	0	0	0
	10h45-11h	0	1	1
	TOTAL	0	2	2
11h	11h-11h15	2	0	2
	11h15-11h30	0	0	0
	11h30-11h45	0	0	0
	11h45-12h	0	0	0
	TOTAL	2	0	2
12h	12h-12h15	1	0	1
	12h15-12h30	0	0	0
	12h30-12h45	0	0	0
	12h45-13h00	0	0	0
	TOTAL	1	0	1
13h	13h-13h15	2	0	2
	13h15-13h30	2	2	4
	13h30-13h45	0	0	0
	13h45-14h	0	0	0
	TOTAL	4	2	6
14h	14h-14h15	1	0	1
	14h15-14h30	1	0	1

	14h30-14h45	1	1	2
	14h45-15h	0	1	1
	TOTAL	3	2	5
15h	15h-15h15	0	2	2
	15h15-15h30	0	1	1
	15h30-15h45	0	3	3
	15h45-16h	0	0	0
	TOTAL	0	6	6
16h	16h-16h15	0	0	0
	16h15-16h30	0	0	0
	16h30-16h45	0	0	0
	16h45-17h	0	0	0
	TOTAL	0	0	0
17H	17h-17h15	0	0	0
	17h15-17h30	0	0	0
	17h30-17h45	0	0	0
	17h45-18h	0	0	0
	TOTAL	0	0	0
TOTAL 13/07/2010		12	12	

E.1.3 – Site secondaire : Balerante (Woro), samedi 15/05/2010

Nombre total de camions entrant : 235 ; nombre total de camions sortant : 229.

Marge d'erreur : ± 10 compte tenu des camions éventuellement déjà sur le site avant 7h.

Heure		Nombre de camions		TOTAUX PAR TRANCHE HORAIRE
		Balerante		
		Entrées	Sorties	
7h	07h-07h15	0	0	0
	07h15-07h30	4	0	4
	07h30-07h45	1	1	2
	07h45-08h	1	1	2
	TOTAL	6	2	8
8h	08h-08h15	4	0	4
	08h15-08h30	4	0	4
	08h30-08h45	0	0	0
	08h45-09h	0	1	1
	TOTAL	8	1	9
9h	09h-09h15	7	2	9
	09h15-09h30	11	2	13
	09h30-09h45	8	1	9
	09h45-10h	7	3	10
	TOTAL	33	8	41
10h	10h-10h15	19	4	23
	10h15-10h30	23	2	25
	10h30-10h45	21	7	28
	10h45-11h	25	9	34
	TOTAL	88	22	110
11h	11h-11h15	10	1	11

	11h15-11h30	21	3	24
	11h30-11h45	0	4	4
	11h45-12h	0	8	8
	TOTAL	31	16	47
12h	12h-12h15	5	14	19
	12h15-12h30	3	17	20
	12h30-12h45	7	12	19
	12h45-13h00	3	13	16
	TOTAL	18	56	74
13h	13h-13h15	4	21	25
	13h15-13h30	7	10	17
	13h30-13h45	7	8	15
	13h45-14h	6	7	13
	TOTAL	24	46	70
14h	14h-14h15	8	13	21
	14h15-14h30	4	14	18
	14h30-14h45	0	12	12
	14h45-15h	1	4	5
	TOTAL	13	43	56
15h	15h-15h15	0	3	3
	15h15-15h30	3	1	4
	15h30-15h45	5	3	8
	15h45-16h	1	2	3
	TOTAL	9	6	18
16h	16h-16h15	0	7	7
	16h15-16h30	2	4	6
	16h30-16h45	0	2	2
	16h45-17h	1	3	4
	TOTAL	3	16	19
17H	17h-17h15	1	4	0
	17h15-17h30	1	3	0
	17h30-17h45	0	4	0
	17h45-18h	0	2	0
	TOTAL	2	13	0

TOTAL 13/07/2010	235	229
------------------	-----	-----

Annexe E.2 – Quelques données officielles : les volumes extraits dans la Gendol entre 2000 et 2008

Volumes (m³) communiqués par le Bureau des Mines de Sleman (2010), d'après quelques comptages mensuels simultanés réalisés dans les différents péages de Sleman près de la Gendol. Aucun chiffre pour la Boyong ou la Opak. Ce type de tableau n'a pas été trouvé dans les autres districts.

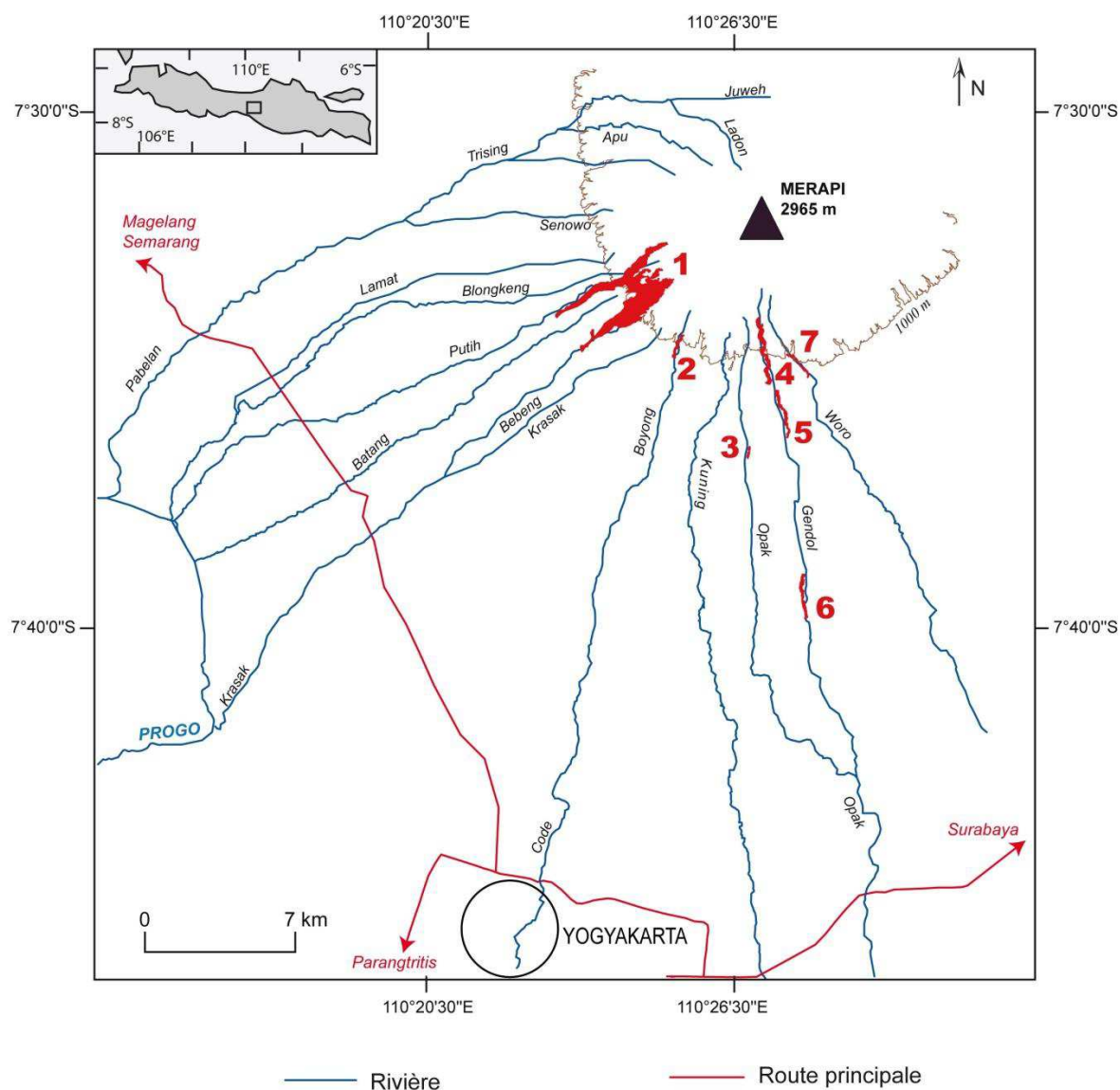
BLOCS	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
janvier	199	1324	9921	1622	1289	2140	1483	3324	8045
février	1464	158	-	5951	1143	1516	868	4341	136
mars	1121	23483	-	1867	9335	3598	889	11710	1823
avril	198	52950	-	-	410	2788	24	4924	2612
mai	202	966	-	767	5845	1057	1155	2565	562
juin	775	232	-	1927	1157	1661	1116	16822	157
juillet	330	-	152	4	458	4935	4273	139	6276
août	1269	3284	1234	588	4926	819	6250	3836	16269
septembre	2006	878	69	6308	2572	2674	8310	4291	9562
octobre	17519	765	5098	7345	4113	8171	21346	8863	10912
novembre	6492	4052	3443	17341	4859	2948	4010	13756	11796
décembre	46646	3843	5130	34108	18497	9156	10976	25731	18688
TOTAL	78221	91935	25017	77828	54604	41463	60700	100302	86838

SABLES	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
janvier	425	2039	9606	27880	7087	14581	2676	43126	14229
février	1048	8221	8463	22272	5524	1826	1523	34064	11766
mars	679	55604	6732	19590	19399	23084	1879	24460	6710
avril	1192	50046	4551	2944	8023	3173	280	6762	6622
mai	947	8831	3245	26840	7651	2014	1857	34869	6615
juin	1717	13698	7312	3018	3859	6425	588	52673	796
juillet	755	-	13027	3640	4631	4558	2208	7357	11478
août	5904	6080	5650	13285	4815	2267	9128	16502	10805
septembre	4823	2884	5166	23185	9416	2259	6027	18406	5595
octobre	9789	17640	10590	16235	6403	9570	8755	6399	9638
novembre	8717	6982	25558	32835	3798	6181	19406	12133	14149
décembre	43961	12075	7770	37519	17618	21287	24492	20197	21397
TOTAL	79957	184100	107670	229243	98224	97225	78819	276948	119800

Annexe E.3 – Aperçus des sites d'extraction du Merapi

Pour améliorer la qualité visuelle des cartes, les sites d'extraction ont été systématiquement symbolisés par des figurés ponctuels aux chapitres 6 et 7. Pour permettre au lecteur d'avoir un meilleur aperçu de leur extension spatiale réelle, les documents suivants les représentent à l'échelle.

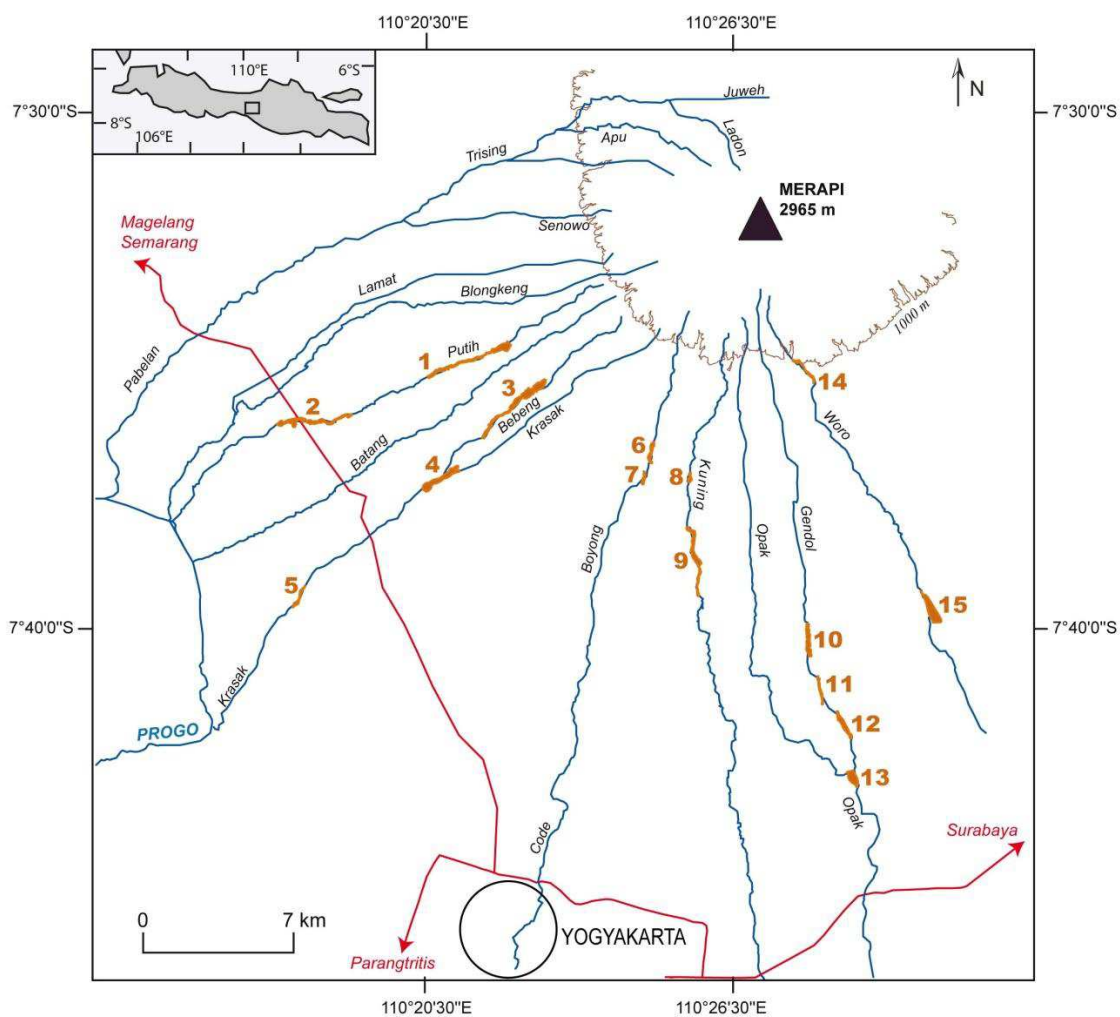
E.4.1 – Les principaux sites d'extraction des années 2000



- 1 : Jurangjero
- 2 : Turgo
- 3 : Pagerjurang
- 4 : Jambu-Kaliadem
- 5 : Manggong
- 6 : Argomulyo
- 7 : Balerante

Extension du site de la Apu inconnu.

E.4.2 – Les sites d'extraction en juin 2011



— Rivière

— Route principale

1 : Srumbung	33 ha
2 : Jumoyo	27 ha
3 : Kaliurang	41 ha
4 : Sudimoro	27 ha
5 : Pondokrejo	6 ha
6 : Kemiricilik	7 ha
7 : Kemiri	4 ha
8 : Dam Kuning	3 ha
9 : Cangkringan	28 ha
10 : Bronggang	12 ha
11 : Plumbon	10 ha
12 : Jambon	13 ha
13 : Opak-Gendol	14 ha
14 : Balerante	15 ha
15 : Sukorini	24 ha

RÉSUMÉ

Cette thèse aborde l'aspect dual des lahars, en s'intéressant aux corridors qu'ils forment sur les pentes du volcan, et dans lesquels se pratiquent des extractions de sables et de blocs. La méthode combine terrain (mesures topographiques, échantillonnage, enquêtes, questionnaires), laboratoire (sédimentologie) et analyse d'images satellites. La thèse s'intéresse d'abord à l'étude des lahars en tant qu'aléas, à leur récurrence, aux événements principaux survenus pendant la mousson 2010-2011, et examine les rythmes et processus de formation de corridors de lahars. Ces impacts causent des dégâts, qui sont quantifiés et cartographiés. Une étude de la perception et la connaissance de l'aléa permettent de mieux situer les communes menacées. Enfin, après avoir étudié la formation des corridors, le matériel qui les compose est analysé : différents lithofaciès sont décrits, et une attention plus spéciale est portée sur les sables qui représentent une matière première prisée. La thèse explique le fonctionnement des extractions, et quantifie l'évolution de cette activité. Les conséquences de l'éruption de 2010 sont analysées pour mieux saisir le fonctionnement de cette activité, et pour tenter de comprendre le risque qui peut y exister pour les travailleurs. Cela ouvre sur une vision plus large des processus de vulnérabilité, de capacité et de résilience, et aboutit à une analyse systémique du risque dans lequel l'activité d'extraction tient une place importante. La thèse explore différents aspects des lahars, différents espaces dangereux (villages/sites d'extraction). L'analyse est réalisée à l'échelle du volcan, soutenue par des études de cas à échelle locale.

Mots-clés : lahars ; dépôts volcanoclastiques ; vulnérabilité ; risque ; ressource ; Merapi ; Indonésie

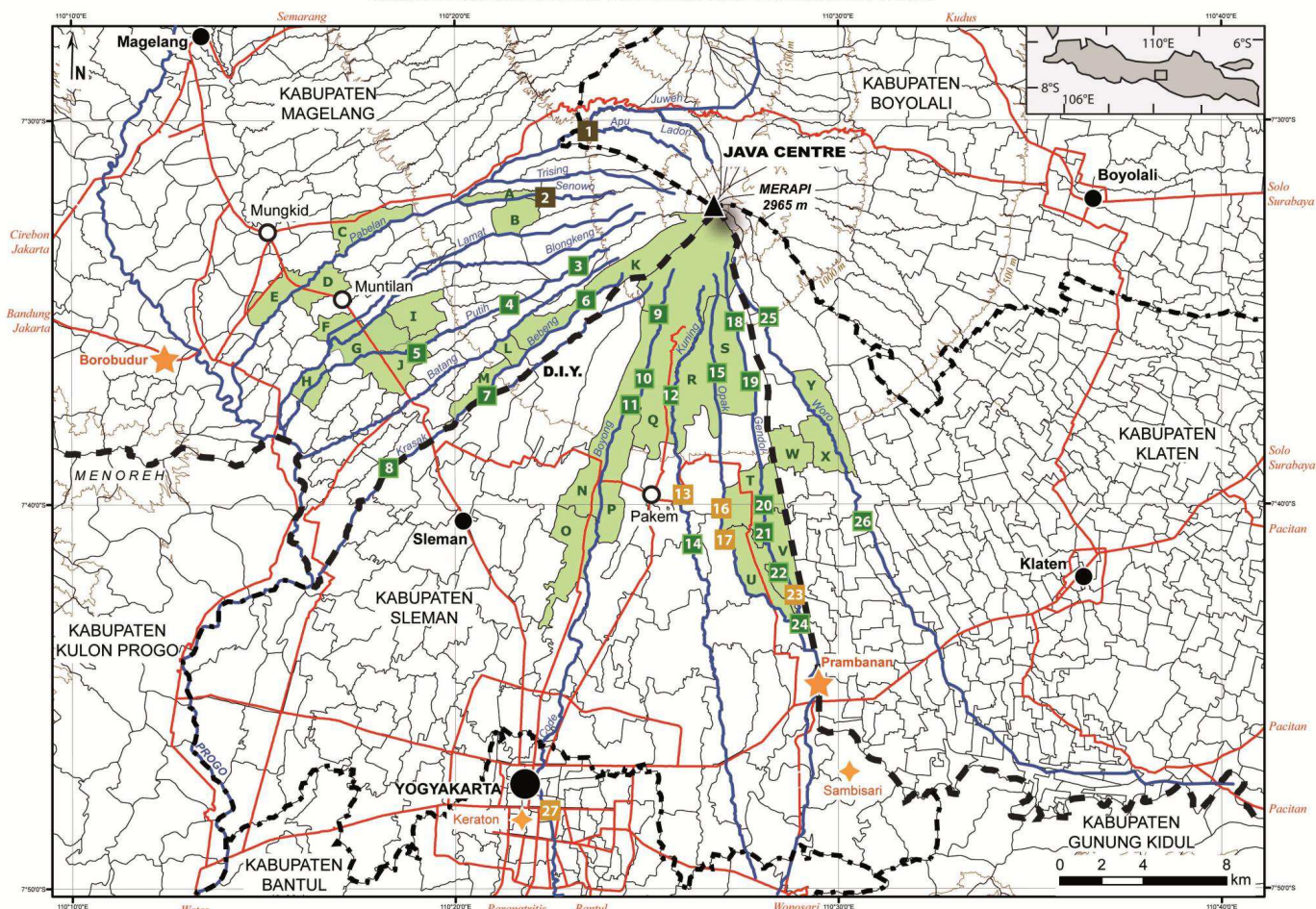
ABSTRACT

LAHAR-PRONE AREAS ON MERAPI VOLCANO BETWEEN RISK AND RESOURCE. CONTRIBUTION TO RISK STUDIES ON MERAPI VOLCANO (JAVA, INDONESIA)

This PhD dissertation focuses on lahar paths which form on the slopes of Merapi volcano, where boulders and sand mining take place. The method combines different approaches: fieldwork (topographic measurements, sampling, interviews and questionnaire-based surveys), laboratory (sedimentology) and remote sensing. The thesis first describes lahars as hazards: their recurrence, and the main events which occurred during the 2010-2011 monsoon are detailed, and the geomorphic processes of lahars paths is explained. These impacts generate heavy damages, which are quantified and mapped. Hazard perception survey helps to better localize risk areas. Finally, volcanoclastic deposits are analyzed: different lithofacies are described, and special attention is paid to the sandy interclast matrix. The dissertation describes sand mining at Merapi volcano, quantifies the volumes extracted and the main evolutions of the activity. The consequences of the eruption of 2010 are analyzed and the risk for workers is assessed: sand mining spots need to be considered as dangerous area, and must not be forgotten in risk studies on Merapi. Indeed, resources and livelihoods are valuable hints of social vulnerability. Such a study helps to reveal the vulnerability, capacity and resilience of local community, and leads to a systemic risk analysis in which mining activity plays an important role. To conclude, this dissertation explore the different aspects of lahars (hazard or resource), different dangerous areas (villages or sand mining spots), and contributes to a better and systemic understanding of risk at Merapi volcano.

Keywords: lahars; volcanoclastic deposits; vulnerability; risk; resource; Merapi; Indonesia.

LE VOLCAN MERAPI
CARTE DE LOCALISATION DES LIEUX ETUDIES DANS LA THESE



Equidistance des courbes de niveaux : 500 m
Fond de carte : base de données topographiques digitale, BAKOSURTANAL

L'espace du Merapi

AXES ET RESEAU URBAIN

- Capitale de province, métropole nationale
- Capitale de district (*kabupaten*), pôle administratif local, services.
- Ville-carrefour de piémont (gares routières, marchés)
- Axe routier à 4 voies (*jalan raya*)

LIMITES ADMINISTRATIVES

- Limite de province (Java-Centre et D.I.Y.)
- Limite de district (*kabupaten*)
- Limite de commune (*desa*)

**MONUMENTS HISTORIQUES :
LE CENTRE CULTUREL JAVANAIS**

- ★ Temples appartenant au patrimoine mondial de l'UNESCO
- ◆ Autres principaux monuments historiques

Sites étudiés dans la thèse

INFRASTRUCTURES

- 1 Sabo-dam de la vallée Apu
- 2 Sabo-dam SE-RD5 de la Senowo

SITES D'EXTRACTION

- 3 Jurangjero
- 4 Srumbung
- 5 Jumoyo
- 6 Kaliurang
- 7 Sudimoro
- 8 Pondokrejo
- 9 Turgo
- 10 Kemiricilik
- 11 Kemiri
- 12 Dam Kuning
- 14 Cangkringan
- 15 Pagerjurang
- 18 Jambu-Kaliadem
- 19 Manggong
- 20 Bronggang
- 21 Plumbon
- 22 Jambon
- 24 Opak-Gendol
- 25 Balerante
- 26 Sukorini

VILLAGES (DUSUN)

- 13 Padasan
- 16 Panggung
- 17 Teplok
- 23 Ngerdi
- 27 Quartiers le long de la rivière Code à Yogyakarta

COMMUNES (DESA) CITEES

- | | | | | |
|----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|
| A : Mangunsuko | F : Gunungpring | K : Kemiren | P : Candibinangun | U : Bimomartani |
| B : Sumber | G : Gulon | L : Kamongan | Q : Hargobinangun | V : Sindumartani |
| C : Gondowangi | H : Sirahan | M : Sudimoro | R : Umbulharjo | W : Bawukan |
| D : Tamanagung | I : Bringin | N : Purwobinangun | S : Kepuharjo | X : Talun |
| E : Pabelan | J : Jumoyo | O : Donoharjo | T : Argomulyo | Y : Kendalsari |